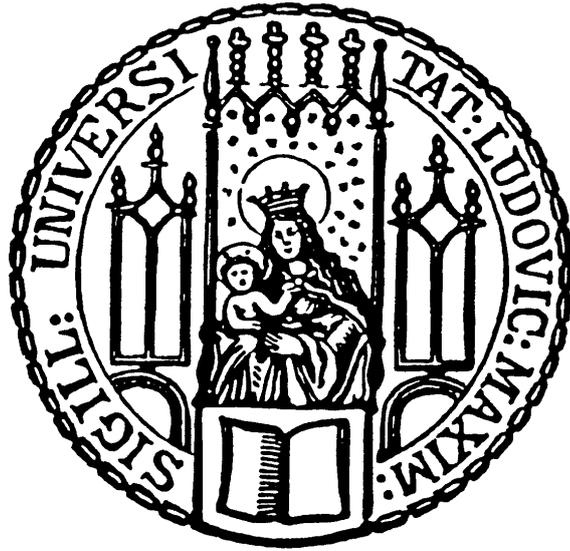


Studien zu Effizienz und Akzeptanz des ATLAS-Myontriggers mit simulierten Messdaten



Diplomarbeit

vorgelegt der
Fakultät für Physik
der
Ludwig-Maximilians-Universität München

von
Martin Lamprecht

München, den 13. Juni 2007

Erstgutachter: Prof. Dr. Otmar Biebel
Zweitgutachter: Prof. Dr. Wolfgang Dünneberger

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	LHC und der ATLAS-Detektor	1
1.2	Koordinatensystem	3
1.3	Detektoraufbau	4
1.3.1	Innerer Detektor	4
1.3.2	Kalorimeter	5
1.3.3	Myonspektrometer	6
2	Trigger am ATLAS-Detektor	9
2.1	Level 1 Trigger	9
2.2	Level 2 Trigger	10
2.3	Level 3 Trigger (Event Filter)	11
3	Triggersimulation in Athena	13
3.1	Athena Framework	13
3.2	Produktion simulierter Ereignisse	13
3.3	Triggerinformation in AOD	14
3.3.1	Level 1 - LVL1_ROI	15
3.3.2	Level 2 - MuonFeature	15
3.3.3	Level 3 (Event Filter) - TrigMuonEF	15
3.3.4	Triggermenü - TriggerDecision	15

4 Studien mit simulierten Daten	17
4.1 Triggereffizienz aus simulierten Daten für einzelne Myonen	17
4.1.1 Triggereffizienzen für Level 1	17
4.1.2 Triggereffizienzen für Level 2	22
4.1.3 Triggereffizienzen für Level 3 (Event Filter)	25
4.1.4 Ladungsabhängigkeit der Triggereffizienz	28
4.1.5 Auflösung der Level 2 / Event Filter p_T -Abschätzung	31
4.2 Bestimmung von Myontriggereffizienzen mit der Tag & Probe Methode	34
4.3 Studien zur Effizienz von Myon- und Dimyontriggersignaturen	38
4.3.1 Triggersignaturen für Einzelmyonen	38
4.3.2 Myontriggersignaturen für $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$	40
4.3.3 Dimyontriggersignaturen für $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$	42
4.3.4 Dimyontrigger bei Zerfällen von Leptoquarks der zweiten Generation	44
5 Zusammenfassung und Ausblick	49
5.1 Zusammenfassung	49
5.2 Ausblick	50
A Anhang	53
A.1 Verwendete Datensätze	53
A.1.1 Einzelmyonen	53
A.1.2 $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$	56
A.1.3 Leptoquarks der zweiten Generation (400 GeV)	59
A.2 Bestimmung des statistischen Fehlers für Triggereffizienzen	60
Abbildungsverzeichnis	63
Tabellenverzeichnis	65
Literaturverzeichnis	67

1 Einführung

1.1 LHC und der ATLAS-Detektor

In Zusammenarbeit von über 2000 Physikern aus 34 Ländern entsteht tief unter dem Genfer Vorort Meyrin unter der Leitung der Europäischen Organisation für Kernforschung CERN¹ der größte Teilchenbeschleuniger der Welt: der *Large Hadron Collider* (LHC).

Hierfür benutzt man den 27 km langen ringförmigen Tunnel des ehemaligen LEP²-Experiments, der 50 bis 100 m tief unter der Erdoberfläche teils auf schweizerischem, teils auf französischem Hoheitsgebiet verläuft.

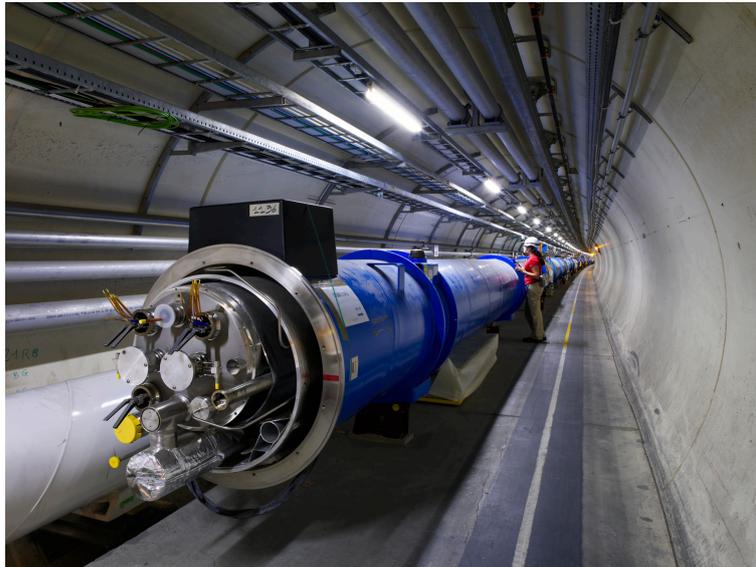


Abbildung 1.1: LHC Tunnel [1]

Der Collidertunnel (vgl. Abb. 1.1) enthält zwei Strahlrohre. Sie sind umgeben von supra-leitenden Magneten, die mit flüssigem Helium gekühlt werden. In jedem der beiden Rohre wird auf diese Weise jeweils die Bahn eines Strahls von Protonen gekrümmt, so dass die beiden Strahlen zueinander entgegengesetzt um den Ring zirkulieren. Sie können an vier

¹Das Akronym „CERN“, abgeleitet von der ursprünglichen Bezeichnung „Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire“, wurde beibehalten (vgl. [1]).

²Large Electron Positron Collider

Wechselwirkungspunkten fokussiert werden, um die auf eine kinetische Energie von 7 TeV beschleunigten Protonen zur Kollision zu bringen, so dass eine Schwerpunktsenergie von 14 TeV für Experimente zur Verfügung steht.

Die Protonen werden zu Paketen (*Bunches*) zusammengefasst, von denen ca. 2800 gleichzeitig um den Ring laufen. Da ein Umlauf ca. $90 \mu\text{s}$ dauert, ergibt sich zwischen den Paketen ein Abstand von 25 ns.

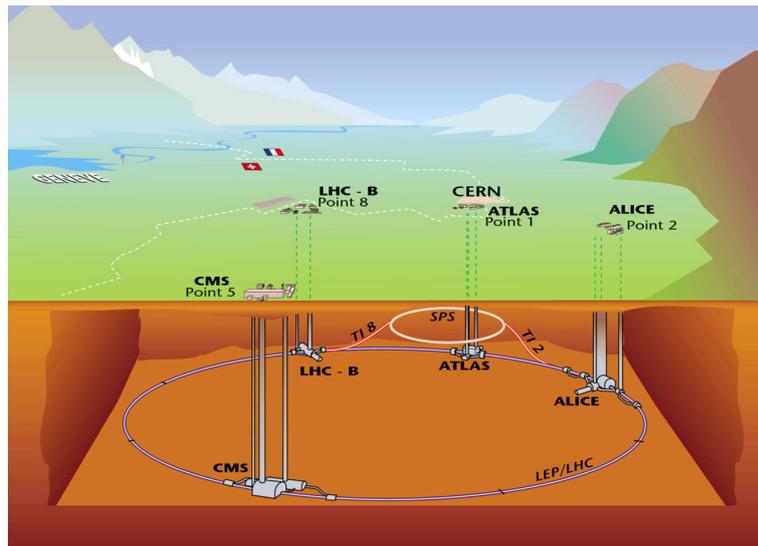


Abbildung 1.2: Überblick über die Experimente am LHC [1]

Am LHC werden sechs Detektorexperimente angesiedelt, darunter zwei große „Allzweck“-Teilchendetektoren: CMS³ und ATLAS⁴.

Der ATLAS Detektor hat einen Durchmesser von 25 m und wiegt bei einer Länge von 46 m ca. 7000 t. Bei jeder Paketkollision in der Detektormitte, *Bunch-Crossing* genannt, kommt es zu mehreren Proton-Proton Wechselwirkungen, die als *Ereignisse* bezeichnet werden. Bei jedem Ereignis entsteht jeweils eine Vielzahl verschiedener Teilchen unterschiedlicher Energie. Um möglichst die komplette Ereignisinformation aufzeichnen zu können, müssen die relevanten Teilcheneigenschaften so präzise wie möglich gemessen werden. Nur so können auch Physikprozesse, deren genaues Erscheinungsbild im Detektor bis heute noch weitgehend unbekannt ist, beobachtet und nachgewiesen werden.

Hierfür hat man bei ATLAS einen zwiebel förmigen Aufbau gewählt, wie er allgemein oft für Teilchendetektoren verwendet wird. Dabei bestehen die einzelnen Schichten aus verschiedenen Lagen von Subdetektoren. Die Spuren, die ein Teilchen in diesen Detektorschichten hinterlässt, erlauben sowohl eine effektive Identifikation als auch eine genaue Messung von Energie und Impuls.

³„Compact Muon Solenoid“, ein weiterer großer Elementarteilchendetektor am CERN

⁴ursprünglich „A Toroidal LHC Apparatus“, wird aber aktuell nur noch als Eigenname benutzt (vgl. [2]).

1.2 Koordinatensystem

Vor der eigentlichen Beschreibung des Detektoraufbaus soll zunächst das ATLAS-Koordinatensystem eingeführt werden, wie es im „ATLAS Detector and Physics Technical Design Report“ [3] festgelegt ist.

Wie in Abbildung 1.3 dargestellt, definiert die Strahlrichtung die z -Achse, auf der die x - y -Ebene senkrecht steht. Die positive x -Achse zeigt vom Wechselwirkungspunkt zum Mittelpunkt des LHC-Beschleunigerrings, die positive y -Richtung nach oben.

Transversalimpuls p_T , in und transversale Energie E_T sind als Projektion auf die x - y -Ebene definiert.

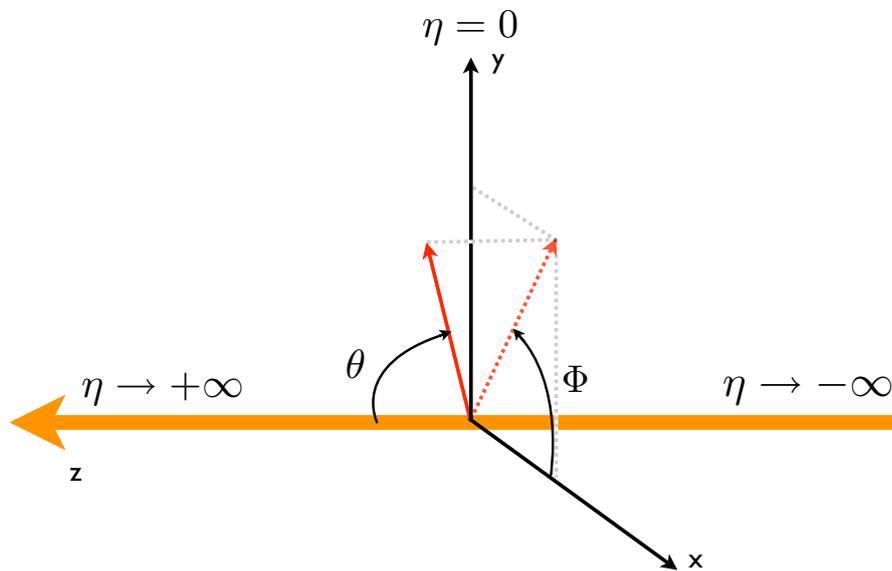


Abbildung 1.3: ATLAS-Koordinatensystem

Azimutwinkel ϕ , Polarwinkel θ , Pseudorapidität η

Richtungen vom Wechselwirkungspunkt („Primärvertex“) aus gesehen werden in Kugelkoordinaten angegeben, wobei der Azimutwinkel ϕ um die Strahlachse herum gemessen wird. Der Polarwinkel θ ist der Winkel zur Strahlachse. Der Wertebereich für θ liegt zwischen 0 und π , der Wertebereich für ϕ zwischen $-\pi$ und π .

Statt dem Polarwinkel θ verwendet man oft die Pseudorapidität, definiert als:

$$\eta = -\ln \left(\tan \frac{\theta}{2} \right) \quad (1.1)$$

Diese Definition hat den Vorteil, dass Differenzen zweier η -Werte gegenüber Lorentzboost in z -Richtung invariant sind.

So kann der diesbezüglich ebenfalls invariante Abstand ΔR im Pseudorapiditäts-Azimutwinkelraum definiert werden als:

$$\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2} \quad (1.2)$$

In Anlehnung an die Detektorgeometrie bezeichnet man den Bereich

- $0 \leq |\eta| \leq 1,0$ als *Fassbereich* (*barrel region*),
- $1,0 < |\eta| < 1,4$ als *Übergangsbereich* (*transition region*),
- und $1,4 \leq |\eta| \leq 2,7$ als *Endkappenbereich* (*endcap region*).

1.3 Detektoraufbau

Der ATLAS Detektor (eine schematische Darstellung ist in Abb. 1.4 gegeben) gliedert sich in vier Hauptkomponenten: Der *Innere Detektor* vermisst präzise die Teilchenspuren, die *Kalorimeter* messen die Energie von leicht zu absorbierenden Teilchen und das *Myonspektrometer* führt zusätzliche Messungen für hochenergetische Myonen durch. Das Magnetsystem sorgt für die zur Impulsmessung erforderliche Krümmung der Bahnen geladener Teilchen im Inneren Detektor und Myonspektrometer.

Die nun folgende Darstellung soll einen kurzen Überblick über die wichtigsten Detektor-komponenten vermitteln, soweit es für das Verständnis dieser Arbeit erforderlich ist. Tiefergehende Informationen sind unter anderem in „ATLAS Detector and Physics Performance Technical Design Report“ [3] bzw. „ATLAS Muon Spectrometer Technical Design Report“ [4] verfügbar.

1.3.1 Innerer Detektor

Der Innere Detektor beginnt bereits in wenigen Zentimetern Abstand von der Strahlachse und hat einen äußeren Radius von 1,2 m. Seine Hauptaufgabe ist es, die Spur geladener Teilchen zu vermessen, indem er ihre Wechselwirkung mit Materie an mehreren Punkten erfasst. Aus der Bahnkrümmung im Magnetfeld erhält man den Teilchenimpuls, während die Ortsinformation über den Anfang der Teilchenspur zur Teilchenidentifikation herangezogen werden kann.

Der innerste Teil des Detektors, der *Pixeldetektor*, besteht aus $250 \mu\text{m}$ dickem Silizium und enthält 1744 Module mit je 47.000 Pixeln. Dank der geringen Pixelgröße von $50 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ ist eine exakte Spurvermessung möglich. Auslesechips und sonstige elektronische Komponenten müssen besonders hart gegen ionisierende Strahlung sein, um so nahe am Wechselwirkungspunkt dauerhaft funktionieren zu können.

Der *Semi Conductor Tracker* (SCT) in der Mitte des Inneren Detektors funktioniert auf ähnliche Weise, allerdings mit langgezogenen Streifen anstelle von Pixeln. Er ist der für die Spurvermessung in der Transversalebene wichtigste Teil des Inneren Detektors,

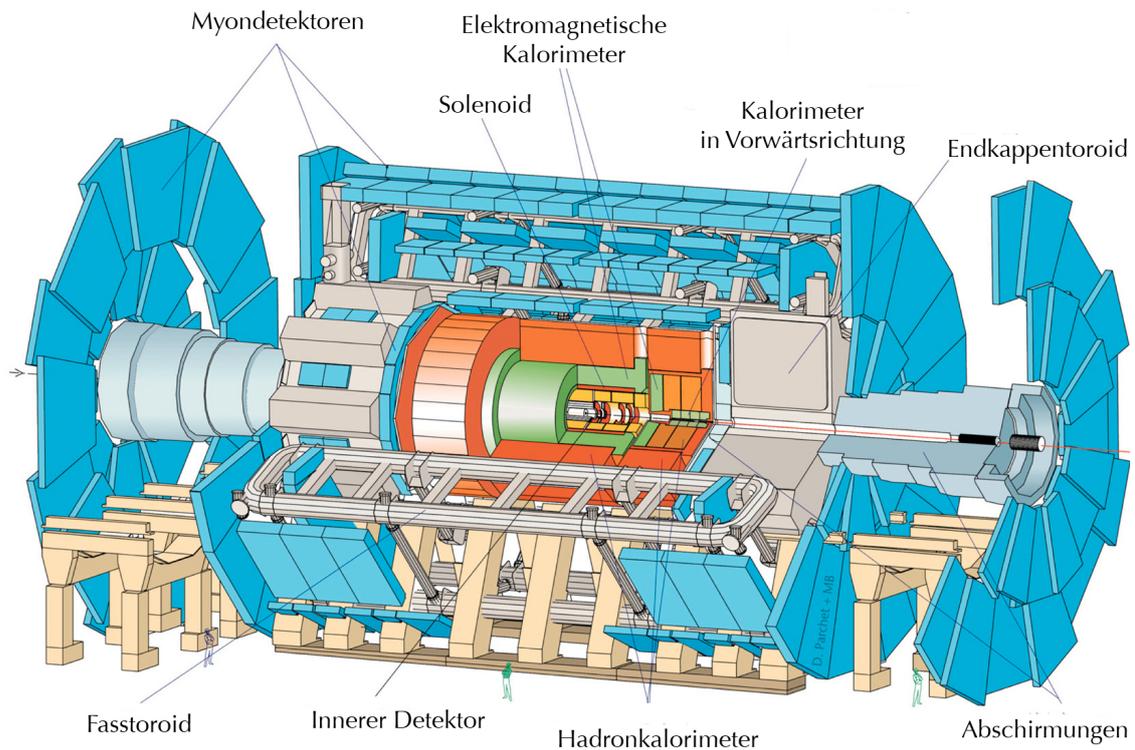


Abbildung 1.4: Schematische Darstellung des ATLAS-Detektors, nach [1]

da er Messungen über einen deutlich weiteren Abstandsbereich vornehmen kann als der Pixeldetektor, mit mehr Messpunkten bei ähnlicher (allerdings eindimensionaler) Auflösung.

Der *Transition Radiation Tracker* (TRT) ist die äußerste Komponente des Inneren Detektors und eine Mischung aus Straw- und Übergangsstrahlungsdetektor. Er liefert eine deutlich gröbere Auflösung als die zuvor beschriebenen Detektoren. Dies nimmt man jedoch in Kauf, um einerseits einen größeren Bereich abzudecken und andererseits eine zu den anderen beiden Teilen des Inneren Detektors komplementäre Funktionsweise verwenden zu können. Zugleich hilft die Übergangsstrahlung, Elektronen von Pionen zu trennen.

1.3.2 Kalorimeter

Außerhalb des Solenoidmagneten, der den Inneren Detektor umgibt, sitzen die Kalorimeter. Ihre Aufgabe ist es, die Energie der vom Wechselwirkungspunkt kommenden Teilchen zu messen, indem sie diese absorbieren. Bei ATLAS gibt es verschiedene Kalorimeter: ein inneres elektromagnetisches Kalorimeter und ein äußeres hadronisches Kalorimeter. Beide sind *Sampling-Kalorimeter*: sie absorbieren Energie in Schichten von Materialien hoher Dichte und vermessen in den Zwischenräumen den resultierenden Teilchenschauer, um daraus einen Rückschluss auf die ursprüngliche Teilchenenergie zu ziehen.

Das *elektromagnetische Kalorimeter* (EM-Kalorimeter) absorbiert Energie von elektromagnetisch wechselwirkenden Teilchen. Es kann sowohl Ort als auch Menge der von

geladenen Teilchen oder Photonen deponierten Energie präzise vermessen. Als Absorbermaterial wird Blei und Edelstahl verwendet, flüssiges Argon dient als Sampling-Material.

Das *Hadronkalorimeter* absorbiert die Energie der Teilchen, die durch das EM-Kalorimeter hindurchgelangen, aber stark wechselwirken (also hauptsächlich Hadronen) und ist dabei deutlich weniger präzise als das EM-Kalorimeter. Stahl dient als Absorber, szintillierende Kacheln als Sampling-Material. Der vordere Teil des Hadronkalorimeters nutzt wie das EM-Kalorimeter ebenfalls flüssiges Argon als Sampling-Material, sowie Kupfer als passiven Absorber.

1.3.3 Myonspektrometer

Hochenergetische Myonen sind der Schlüssel zu vielen interessanten Physikprozessen bei LHC. Um diese nachzuweisen besitzt der ATLAS-Detektor ein hochauflösendes Myonspektrometer, das die Ablenkung der Myonspuren durch große supraleitende Toroidmagnetsysteme mit hochpräzisen Spurkammern vermisst. Zusätzlich stehen schnelle Triggerkammern zur Verfügung.

Im Fassbereich wird die Bahnkrümmung vom Fassmagnetsystem aus acht um das Hadronkalorimeter herum angesiedelten supraleitenden Spulen bewirkt. Für den Endkappenbereich gibt es zwei kleinere Endkappenmagnete an beiden Enden des Fasstoroiden. Im Übergangsbereich zwischen Fass- und Endkappenbereich überlappen sich die Felder. Das magnetische Feld ist so ausgelegt, dass die Feldlinien einerseits so rechtwinklig wie möglich zu den Myonspuren verlaufen, andererseits aber möglichst keine Auflösungsverringering durch Vielfachstreuung auftritt.

Die Messung im Fassbereich wird von Kammern in rund um die Strahlachse zylindrisch angeordneten Schichten (*Stationen*) vorgenommen (vgl. Abb. 1.5), während im Übergangs- und Endkappenbereich die Kammern vertikal in drei Stationen installiert sind.

Da die Zeitauflösung der Spurkammern für eine korrekte Zuordnung des Bunch-Crossings nicht ausreicht, kombiniert man sie mit Triggerkammern, die auf Kosten der räumlichen Auflösung eine bessere Zeitauflösung liefern. In Abbildung 1.6 sind die verwendeten Kammertypen eingezeichnet: Im zentralen Pseudorapiditätsbereich wird die Präzisionsmessung von *Monitored Drift Tube Chambers* (MDT-Kammern) vorgenommen. Für große Pseudorapiditäten und nahe an der Strahlachse geschieht dies durch *Cathode Strip Chambers* (CSC-Kammern).

Für das Triggering werden im Fassbereich *Resistive Plate Chambers* (RPC-Kammern) genutzt, während im Endkappenbereich *Thin Gap Chambers* (TGC-Kammern) zum Einsatz kommen. Beide liegen ungefähr parallel zu den magnetischen Feldlinien und liefern unabhängig von der Präzisionsmessung eine schnelle Abschätzung für den Transversalimpuls.

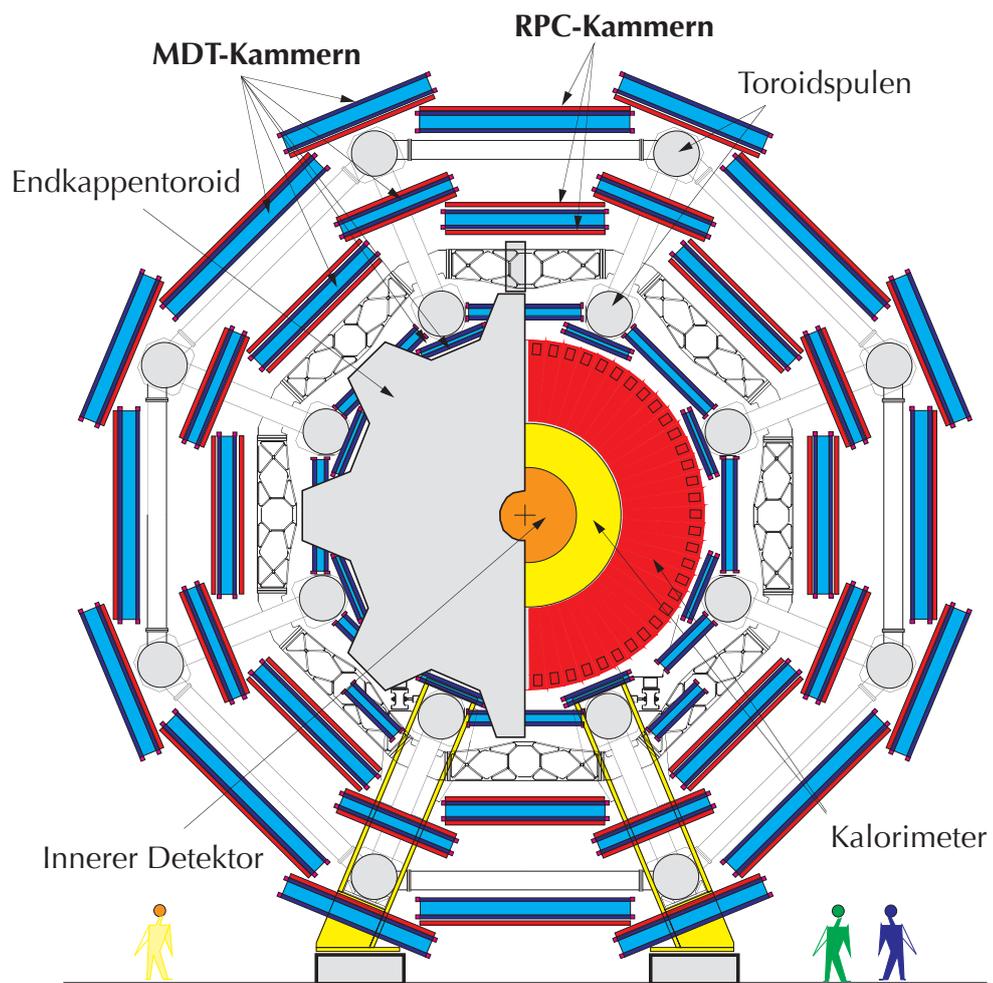


Abbildung 1.5: Querschnitt durch das Myonspektrometer, nach [4]

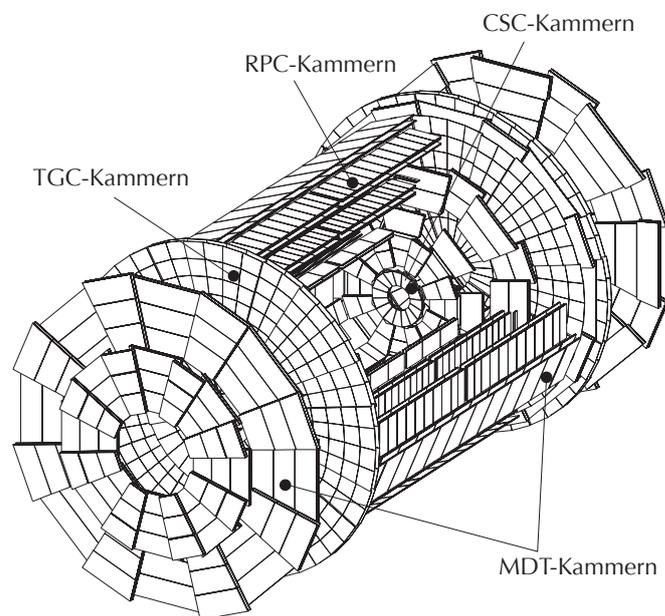


Abbildung 1.6: 3D-Ansicht des Myonspektrometers, nach [4]

2 Trigger am ATLAS-Detektor

Die Designluminosität für den Large Hadron Collider wird bei $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ liegen, so dass pro Sekunde ca. ein Terabyte an Daten anfällt. Da jedoch nur wenige Gigabytes pro Sekunde auf Massenspeicher festgehalten werden können, ist ein äußerst selektives Triggersystem erforderlich, um die notwendige Reduzierung der Datenrate zu gewährleisten.

Andererseits sagt die Theorie jedoch für interessante Physikprozesse wie Leptoquark-Reaktionen einen sehr kleinen Wirkungsquerschnitt voraus (vgl. [5]), so dass eine hohe Rate von Signalereignissen erforderlich ist, um statistisch signifikante Aussagen zu machen. Die Ereignisse müssen deshalb sehr effizient ausgewählt werden.

Um innerhalb möglichst kurzer Zeit eine Auswahl sowohl mit der erforderlichen Selektivität als auch mit hoher Effizienz treffen zu können, hat man bei ATLAS ein Triggersystem in drei Stufen (*Levels*) konzipiert.

2.1 Level 1 Trigger

Der *Level 1 Trigger* ist ein hardwarebasiertes System, das mit Signalen von Kalorimeter und Myonspektrometer arbeitet. Seine Aufgabe ist es, die Ereignisrate mit einer maximalen Verzögerung von $2.5 \mu\text{s}$ von ca. 40 MHz auf 75 kHz zu reduzieren. Bis zur Triggerentscheidung wird die komplette Ereignisinformation in Zwischenspeichern (*Pipeline Memories*) gehalten und anschließend, falls das Ereignis akzeptiert wird, in *Read-out-Buffers* zur Auslese bereitgestellt.

Ein spezieller Trigger für Myonen wird im Fassbereich des Detektors von einem System von Resistive Plate Chambers (RPCs) im Myonspektrometer bereitgestellt (vgl. Abb. 2.1). Es liefert ein schnelles Signal mit grober räumlicher Auflösung. Von den drei MDT-Schichten ist die mittlere mit zwei, die äußere mit einer Lage von RPCs versehen. Mit diesen drei RPC-Lagen (von denen die inneren zwei einen kleineren Abstand zueinander haben) gewinnt man eine Abschätzung für die Krümmung der Spur eines durchlaufenden Myons. Mit Hilfe von Tabellen (*look-up-tables*) in der Elektronik erfolgt die Auswertung sehr schnell. Im Endkappenbereich übernimmt das Triggering ein ähnlich aufgebautes System von Thin-Gap-Chambers (TGCs). Auf diese Weise kann das Level 1 Myontriggersystem Myonen nach sechs programmierbaren Impulsschwellen (üblicherweise 6, 8, 10, 11, 20, 40 GeV^1) unterscheiden (vgl. [4]).

¹Impulse werden in dieser Arbeit (wie in der Teilchenphysik üblich) in GeV angegeben, da bei vernachlässigbarer Ruheenergie Impulse als Energie/c angegeben werden können und die Lichtgeschwindigkeit c in geeigneten Einheiten = 1 gesetzt werden kann.

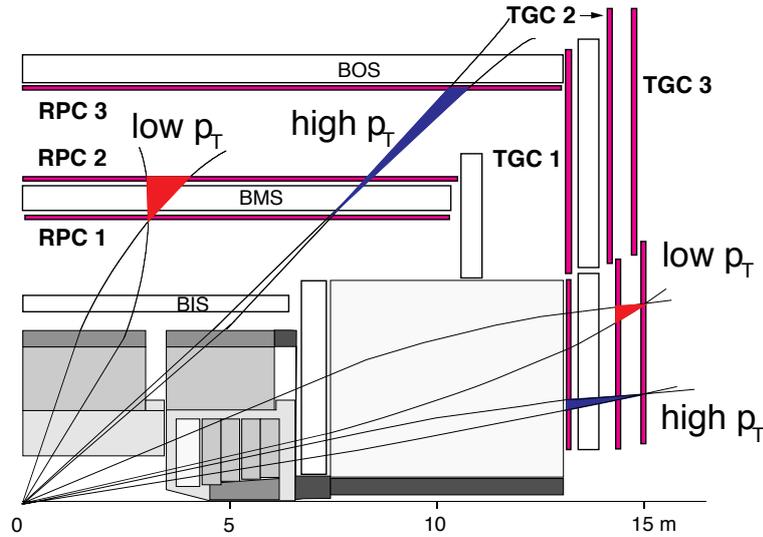


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des ATLAS Level 1 Myon Triggers [4]

Der Algorithmus für Level 1 sucht nach Koinzidenzen in verschiedenen RPC oder TGC Schichten je nach p_T -Schwelle innerhalb von vorprogrammierten geometrischen Wegen (*Trigger Roads*). Außerdem wird eine scharfe Zeitkoinzidenz verlangt.

Für den Fassbereich werden die Schwellen in „high- p_T “ (alle 3 RPC-Lagen werden genutzt) und „low- p_T “ (nutzt nur die inneren 2 RPCs) aufgeteilt. Für den Endkappenbereich werden die TGCs ausgewertet.

Die Regionen, in denen eine Myonspur gefunden wird, werden als „interessant“ markiert (*Regions of Interest*). Dies geschieht mit einer Präzision von $\Delta\phi \times \Delta\eta = 0,1 \times 0,1$ im Fassbereich und mit einer noch höheren Genauigkeit im Endkappenbereich (vgl. [6]).

2.2 Level 2 Trigger

Die nach Level 1 bereits deutlich reduzierte Datenrate ermöglicht es, den *Level 2 Trigger* als Softwarelösung zu implementieren, so dass seine Selektions-Algorithmen auf kommerziellen Standardprozessoren laufen. Er kann innerhalb der vom Level 1 Trigger definierten *Regions of Interest* auf Daten aus allen Subdetektoren von ATLAS zugreifen. Der Level 2 Trigger muss seine Entscheidung binnen 10 ms getroffen haben, deshalb benötigt man effiziente Algorithmen, um uninteressante Ereignisse möglichst schnell verwerfen zu können.

Der Kernalgorithmus für den Level 2 Myontrigger ist *MuFast*, der anhand der Präzisionsmessung aus den MDT-Kammern das Ergebnis von Level 1 bestätigt oder revidiert. Der erste Schritt hierfür ist die globale Mustererkennung (*global pattern recognition*) unter Berücksichtigung der Triggerkammern und des genauen Ortes der MDT-Kammern, allerdings noch ohne Auswertung der Driftzeiten. Anschließend folgt eine lokale Rekonstruktion (*local segment reconstruction*), bei der die Driftzeiten ausgewertet werden, gefolgt von einer schnellen p_T -Abschätzung per Nachschlagetabelle. Um die p_T -Abschätzung von *muFast*

vor allem für Myonen mit kleinem Transversalimpuls weiter zu verbessern, fügt nun der Algorithmus *muComb* eine Auswertung von Informationen aus dem Inneren Detektor hinzu (vgl. [7]).

2.3 Level 3 Trigger (Event Filter)

Auch der *Event Filter* basiert auf Software. Im Unterschied zum Level 2 Trigger erfüllt er seine Aufgabe erst nach dem Zusammensetzen der Ereignisdaten (*Event Building*) und hat somit Zugriff auf die komplette Ereignisinformation. Der Event Filter führt binnen weniger Sekunden eine vollständige Ereignisauswahl und Klassifikation durch und greift dabei auf offline-Algorithmen sowie die volle Detektorkalibrations- und Ausrichtungsinformation zurück. Die vom Event Filter akzeptierten Ereignisse werden auf Massenspeicher festgehalten.

Der Myon Event Filter basiert auf drei Algorithmen: *MOORE*, *MuID Standalone* und *MuID Combined*. Alle drei sind vollständig in das ATLAS Softwareframework *Athena* integriert und werden für ihre Verwendung im Triggerkontext zu *TrigMOORE* zusammengefasst.

TrigMOORE kann in zwei verschiedenen Modi arbeiten: Im *wrapped*-Modus auf den kompletten Detektordaten und im *seeded*-Modus auf den von Level 1 und Level 2 übergebenen Regions of Interest.

Die Aufgabe von MuID Standalone ist es, die von MOORE rekonstruierten Spuren im Myonspektrometer bis zum Entstehungspunkt zu extrapolieren. Auch im Inneren Detektor findet eine Spurrekonstruktion statt, so dass MuID Combined diese Information zur Verbesserung der p_T -Auflösung nutzen kann (vgl. [8]).

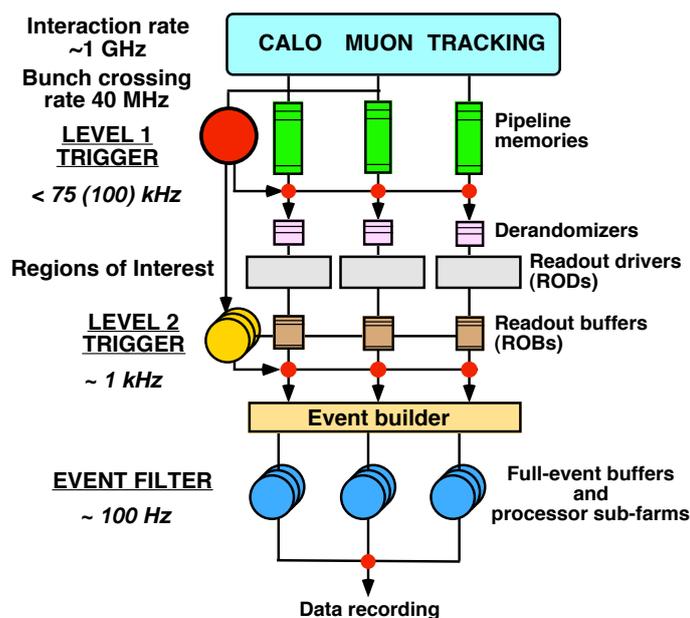


Abbildung 2.2: Triggerstufen bei ATLAS [3]

3 Triggersimulation in Athena

Das Ziel der ATLAS offline-Software Athena ist es, die vom Trigger- und Datenaufnahmesystem gelieferten Ereignisse aufzubereiten, zur Analyse an die Physiker der ATLAS-Kollaboration weiterzuleiten und diesen die für ihre Physikanalysen notwendigen Werkzeuge zur Verfügung zu stellen. Dabei spielen Verarbeitungsgeschwindigkeit und Speicherbedarf ebenso eine Rolle wie die Verlässlichkeit der produzierten Ergebnisse.

3.1 Athena Framework

Athena ist die ATLAS-spezifische Implementierung von Gaudi, einem Software-Framework für Hochenergie-Teilchenphysik.¹

Der modulare Aufbau von Athena ermöglicht es, viele Komponenten gemeinsam zu nutzen, oder aber, falls notwendig, genau auf die Anforderungen spezifischer Experimente zuzuschneiden.

Während der eigentliche Analysecode in *C++* geschrieben wird, geschieht die Steuerung und Konfiguration von Athena durch in der Sprache *Python* (vgl. [10]) geschriebene Scripts, sogenannte *jobOptions-files*. Die Verwendung einer Scriptsprache zur Konfiguration bietet dem Nutzer die Möglichkeit, auf einfache Weise Ein-/Ausgabedaten, Algorithmen oder Dienste auszuwählen, ohne den kompletten Analyse Quellcode neu kompilieren zu müssen.

3.2 Produktion simulierter Ereignisse

Insbesondere während der Aufbauphase des ATLAS-Experiments hat das Athena Framework noch eine zusätzliche Aufgabe: Das Bereitstellen von simulierten Daten, um bereits im Vorfeld eine Möglichkeit zu haben, den Detektor besser verstehen zu lernen und spätere Physikanalysen zu konzipieren.

Simulierte Ereignisse werden für das ATLAS-Experiment normalerweise zentralisiert bereitgestellt. Es ist jedoch auch Einzelpersonen möglich, spezielle Datensätze selbst herzustellen. Zwei Wege sind hierzu üblich: Mit der schnellen Simulation *Atlfast* (vgl. [11]) lassen sich durch parametrische Näherung einige Schritte abkürzen. Um jedoch eine möglichst genaue

¹Weiterführende Informationen zum Thema ATLAS Computing sind im *ATLAS Computing Technical Design Report* (vgl. [9]) zu finden.

Simulation des Triggers zu studieren, werden in dieser Arbeit ausschließlich Datensätze verwendet, die mit Hilfe der *vollen Simulation* (vgl. [9]) erstellt wurden.

Die volle Simulation beinhaltet die folgenden Schritte (vgl. [12]):

- **Generierung:** Zunächst werden mit einem Ereignisgenerator wie *PYTHIA* (vgl. [13]) die Eigenschaften der in einem Physikprozess vorkommenden Teilchen in eine Datei geschrieben. Mit *Particle Generator* (vgl. [14]) als Ereignisgenerator ist es auch möglich, anstatt eines kompletten Physikprozesses nur einzelne Teilchen zu generieren.
- **Simulation:** Die auf diese Weise generierten Ereignisse bilden die Ausgangsbasis für eine Simulation des ATLAS-Detektors mit *GEANT4* (vgl. [15]). Dabei wird die Spur aller vorhandenen Teilchen inklusive aller auftretenden Teilchenschauer simuliert und *GEANT4-Hits* hergestellt, welche die Information über Ort und Menge der Energiedeposition im Detektor beinhalten.
- **Digitalisierung:** aus den GEANT4-Hits wird die Detektorantwort errechnet und in Spannungen und Driftzeiten (*Digits*) dargestellt. An die Stelle dieser künstlich hergestellten Rohdaten tritt dann später die wirkliche Detektorantwort.
- **Rekonstruktion:** Aus den Rohdaten werden nun Spuren und Energieeinträge im Detektor rekonstruiert. Diese können später in unterschiedlichen Datenformaten abgerufen werden.

Das im ATLAS Computing Model favorisierte Datenformat *Analysis Object Data* (AOD) ist so konzipiert, dass es bei möglichst geringem Speicherbedarf die für eine Analyse notwendigen Daten enthält, und ist deshalb Grundlage für diese Arbeit.

3.3 Triggerinformation in AOD

Informationen innerhalb einer AOD-Datei sind durch Objekte repräsentiert, die in *Containern* abgelegt sind. Je nach Typ können diese Objekte z.B. Teilchen, Teilchenspuren oder auch sehr spezielle Dinge wie Regions of Interest repräsentieren, auf deren relevante Eigenschaften dann über die Methoden der Objekte zugegriffen werden kann.

So existiert unter anderem ein Container, der Objekte für alle simulierten Teilchen beinhaltet (*TruthParticle-Container*) und ein Container für alle vom Detektor bzw. dessen Simulation rekonstruierten Myonen (*Myon-Container*).

Auch die Triggerinformationen sind in solchen Containern abgelegt. In den folgenden Abschnitten sollen die für diese Arbeit relevanten Objekttypen eingeführt und ihre wesentlichen Eigenschaften kurz erläutert werden.

3.3.1 Level 1 - LVL1_ROI

Das ATLAS Triggersystem basiert (wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben) auf dem Regions-of-Interest-Prinzip, d.h. Informationen aus als interessant markierten Detektorregionen werden als Eingabedaten für die höheren Triggerstufen herangezogen. RoIs werden vom Level1 Kalorimeter- und Myontrigger gebildet. Relevant sind die Richtung vom Primärvertex in η und ϕ sowie die erfüllten Triggerschwellen für den Transversalimpuls p_T . Diese Informationen stehen in Athena im *LVL1_ROI*-Objekt zur Verfügung.

3.3.2 Level 2 - MuonFeature

MuonFeature ist die Ausgabe des MuFast Algorithmus (vgl. Kapitel 2.2). Für ein Ereignis existiert pro getroffener Region of Interest ein Objekt in den AOD-Daten. Ein solches MuonFeature-Objekt enthält sowohl die η - und ϕ -Werte für einen Myonspurkandidaten als auch den Wert der MuFast- p_T -Abschätzung. MuonFeature ist in der für diese Arbeit verwendeten Athena Version 12.0.6 nur für den Fassbereich des Detektors verfügbar. Eine Erweiterung auf Übergangsregion und Endkappenbereich ist in Vorbereitung.

3.3.3 Level 3 (Event Filter) - TrigMuonEF

TrigMuonEF bietet einen einfachen Zugang zur Myontriggerinformation auf Event Filter Ebene. Pro getroffener Region of Interest ist ein TrigMuonEF-Container gespeichert. Die TrigMuonEF-Container enthalten jeweils ein oder mehrere TrigMuonEF-Objekte, die jeweils eine Myonspur repräsentieren. Die Art der Spur (Moore, MuIDStandalone, MuID Combined, vgl. Kapitel 2.3) lässt sich anhand ihrer *Myoncode*-Eigenschaft feststellen. Jede Spur liefert sowohl ihre Richtung in η und ϕ , als auch eine p_T -Abschätzung.

3.3.4 Triggermenü - TriggerDecision

Für die eigentliche Entscheidungsfindung werden die einzelnen Teile der Triggerinformation zu einem *Triggermenü* zusammengefasst und gesammelt ausgewertet. Hierfür werden zunächst *Triggerschwellen* definiert, die in Form einer Zeichenkette für die Art des auslösenden Objektes (typischerweise Objekte mit hohem Transversalimpuls) sowie eines Schwellenwerts für dessen transversale Energie bzw. Transversalimpuls angegeben sind. So entspräche z.B. „MU20“ einem Myonkandidaten mit einem Transversalimpuls über 20 GeV.

Schwellen für Level 1 werden nach ATLAS-Konvention in Großbuchstaben angegeben (z.B. „MU20“), Schwellen für Level 2 und Event Filter in Kleinbuchstaben (z.B. „mu20“). Ein angehängtes „i“ (z.B. „mu20i“) signalisiert ein zusätzlich angewandtes Isolationskriterium (vgl. [16]).

Diese Schwellen können dann unter Angabe ihrer jeweiligen Multiplizität zu *Signaturen* kombiniert werden, wobei die Definition einer Signatur immer für eine Triggerstufe (Level 1, Level 2, Event Filter) Gültigkeit besitzt. Ein einfaches Beispiel für eine Signatur in ATLAS-Notation wäre beispielsweise „1EM10+1MU20“ („Elektron/Photon-Kandidat mit $E_T \geq 10$ GeV UND Myon-Kandidat mit $p_T \geq 20$ GeV“).

Alle auf einer Triggerstufe definierten Signaturen werden wiederum per ODER verknüpft, so dass ein Ereignis von einer Triggerstufe angenommen wird, sobald es mindestens eine der auf dieser Stufe definierten Signaturen erfüllt. Die Gesamtheit aller definierten Triggersignaturen wird als *Triggermenü* bezeichnet. Für simulierte Datensätze existieren vorgefertigte Triggermenüs, so dass alle in dieser Arbeit verwendeten Datensätze das Menü „CSC-06“ (vgl. [17]) beinhalten.

Dort sind neben weiteren Signaturen die in Tabelle 3.1 angegebenen Einzelmyonsignaturen definiert, außerdem existiert auf Level 1 noch ein Dimyontrigger: „L1_2MU06“.

Level 1	Level 2	Event Filter
L1_MU06	L2_mu6	EF_mu6
L1_MU08		
L1_MU10		
L1_MU11		
L1_MU20	L2_mu20i (sic)	EF_mu20i (sic)
L1_MU40		

Tabelle 3.1: Myontrigger in Triggermenü „CSC-06“ (die mit „sic“ gekennzeichneten Signaturen enthalten entgegen ihrer Bezeichnung kein Isolationskriterium, vgl. [17])

In Athena wird das Triggermenü durch das *TriggerDecision*-Objekt repräsentiert. Die Idee hinter *TriggerDecision* ist es, dem Nutzer eine Schnittstelle zur Verfügung zu stellen, um die Triggerentscheidungen für jedes Event abfragen zu können. Hierzu hält es eine Liste der auf jeder Triggerstufe definierten Signaturen vor, sowie die Information über deren Erfüllung. Diese kann anhand der Zeichenkette für die Triggersignatur abgefragt werden. Außerdem steht die Annahme-/Ablehnungsinformation noch einmal zusammenfassend für jede der drei Triggerstufen, sowie für den gesamten Trigger zur Verfügung (vgl. [18]).

4 Studien mit simulierten Daten

4.1 Triggereffizienz aus simulierten Daten für einzelne Myonen

Um einen ersten Eindruck von Akzeptanz und Effizienz des ATLAS-Myontriggers zu gewinnen, benutzt man am besten einen Datensatz, der mit möglichst hoher Statistik den gesamten Akzeptanzbereich des ATLAS-Myontriggers abdeckt. Der hier verwendete Datensatz beinhaltet 200.000 voll simulierte Einzelmyonereignisse aus privater Produktion, gleichverteilt über einen Transversalimpulsbereich von 0 bis 100 GeV, einen Pseudorapiditätsbereich von $-2,5$ bis $2,5$ sowie einen Azimutwinkelbereich von $-\pi$ bis π (weitere Details im Anhang, vgl. A.1.1). Triggereffizienzen lassen sich bei einem simulierten Datensatz wie diesem recht einfach bestimmen, denn die AOD-Daten enthalten in diesem Fall (anders als bei echten Messdaten) die komplette Information darüber, welche Teilchen mit welchen Eigenschaften ursprünglich generiert wurden (*Truth-Information*). So ist es möglich, für jedes dieser Truth-Teilchen zu bestimmen, ob es Trigger ausgelöst hat, und wenn ja, welche.

4.1.1 Triggereffizienzen für Level 1

Wie bereits in Kapitel 3.3.1 beschrieben, enthält der LVL1_ROI Container die Level 1 Triggerinformation (η , ϕ , erfüllte p_T -Schwelle) über die getroffenen Regions of Interest.

Zur Bestimmung der Level 1 Triggereffizienz sucht man nun zu jedem Truth-Myon die passende getroffene Region of Interest. Als „passend“ wird diejenige RoI bezeichnet, die den kleinsten Abstand $\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2}$ im Pseudorapiditäts-Azimutwinkelraum zum Truth-Myon hat, höchstens aber $\Delta R = 0,25$. Diese Art der Zuordnung nennt man *ΔR -Matching*.

Einzelmyoneffizienz für Level 1 nach Transversalimpuls p_T

Abbildung 4.1 zeigt die mit dieser Methode bestimmte Myontriggereffizienz für Level 1 nach p_T . Für jede der sechs Standardschwellen (6, 8, 10, 11, 20, 40 GeV) sind die Transversalimpulse der Myonen, deren passende RoI diese Schwelle als erfüllt zurückgaben, histogrammiert und die daraus resultierende Verteilung auf die p_T -Verteilung aller Myonen (*Truth-Verteilung*) normiert.

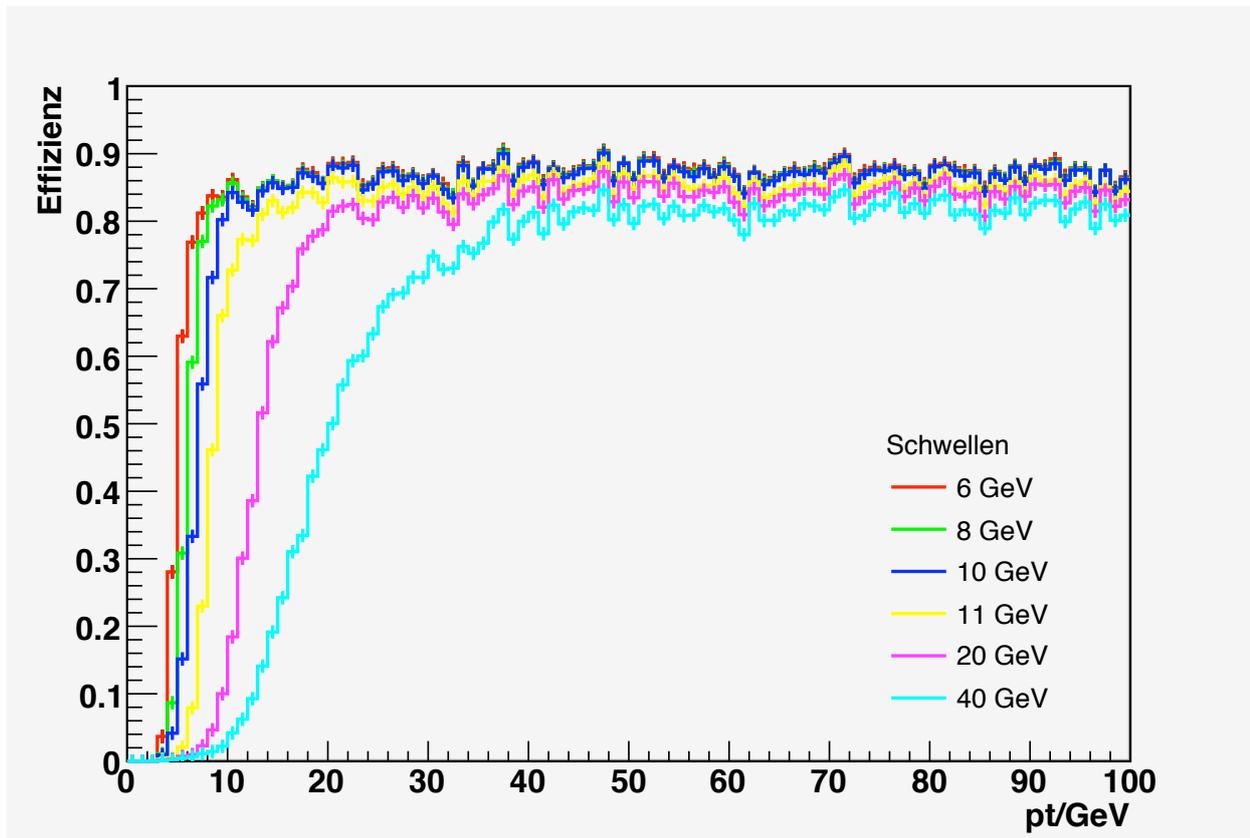


Abbildung 4.1: Einzelmyoneffizienz für Level 1 nach p_T

Die so bestimmten Triggereffizienzen für diesen Datensatz zeigen einen mit zunehmender Höhe der Triggerschwelle flacher werdenden Anstieg (*Turn-on-Kurve*) und sättigen je nach Schwelle bei einem Plateauwert von 80-86%.

Einzelmyoneffizienz für Level 1 nach Pseudorapidität η

Für die Darstellung der Effizienz nach Pseudorapidität η sind in Abbildung 4.2 die Pseudorapiditäten der Myonen je nach Erfüllung der sechs Standardschwellen histogrammiert und auf die Gesamt-Pseudorapiditätsverteilung normiert. Um jedoch die Abhängigkeit der so bestimmten Effizienz von der Truth- p_T -Verteilung aufzulösen, werden jeweils die Myonen, deren Truth- p_T unter der jeweiligen Schwelle liegt, außen vor gelassen.

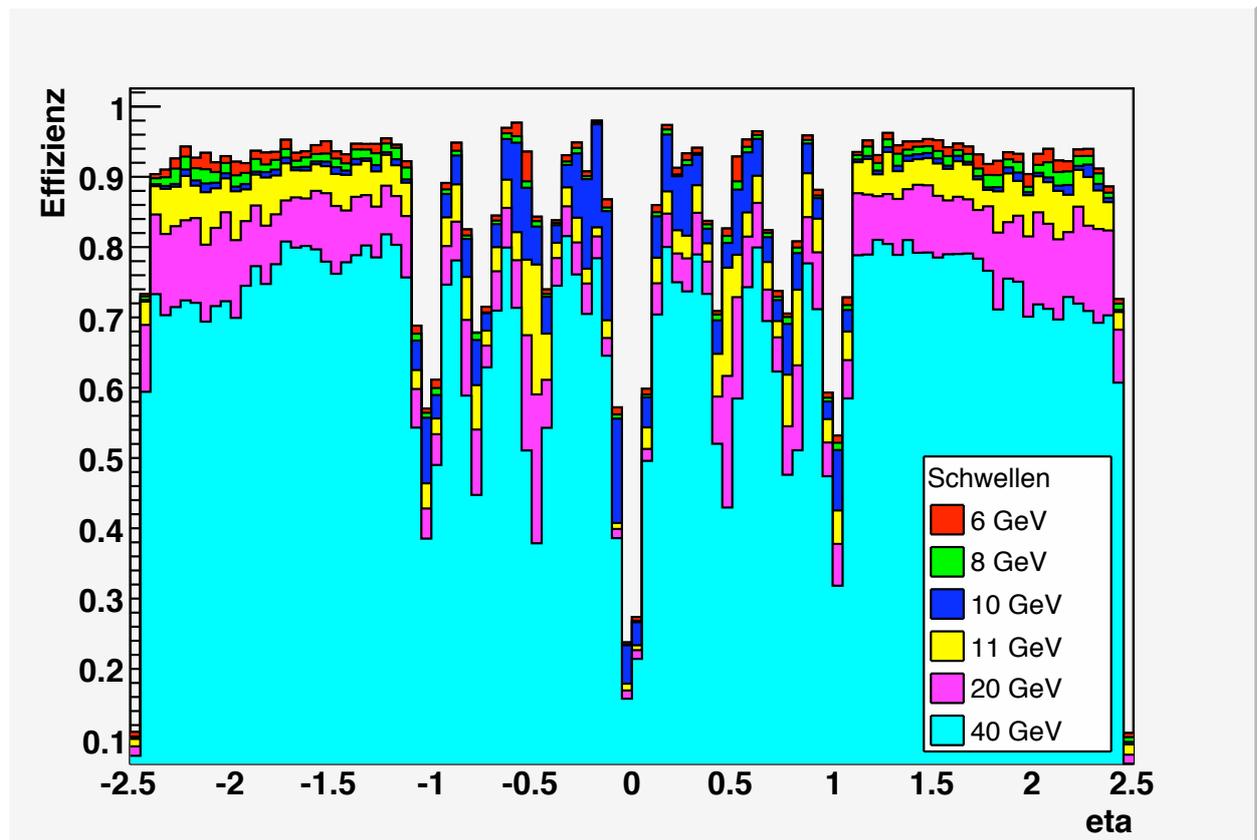


Abbildung 4.2: Einzelmyoneffizienz für Level 1 nach η , statistischer Fehler ca. 0,01

Für das Triggering auf Level 1 müssen mindestens die RPCs einer Lage von Myondetektoren getroffen werden. Vergleicht man die in Abbildung 4.2 sichtbaren Bereiche niedrigerer Effizienz mit dem im ATLAS Technical Design Report [3] vorhergesagten η -Verlauf der geometrischen Akzeptanz für mindestens eine getroffene Schicht von Myondetektoren (siehe Abb. 4.4, gestrichelte Linie), so lassen sich die dort eingezeichneten Akzeptanzlücken zuordnen.

- $\eta \approx 0$: zentrale Lücke (Versorgungsleitungen für den Inneren Detektor, Kalorimeter)
- $|\eta| \approx 0,5$ und $|\eta| \approx 0,8$: Standfüße (*feet*) und Toroidspulen (*ribs*) des ATLAS Detektors
- $|\eta| \approx 1$: Standfüße des ATLAS-Detektors

Die genaue Anordnung der Myonkammern ist in Abbildung 4.3 nochmals dargestellt.

Einzelmyoneffizienz für Level 1 nach Pseudorapidität η und Azimutwinkel ϕ

Abbildung 4.5 gibt exemplarisch für die 20 GeV-Schwelle die Effizienz in Abhängigkeit von Pseudorapidität η und Azimutwinkel ϕ wieder und liefert damit eine „Triggereffizienzkarte“ des Detektors. Myonen mit einem Transversalimpuls unter 20 GeV liegen unter der dargestellten Schwelle und werden nicht berücksichtigt.

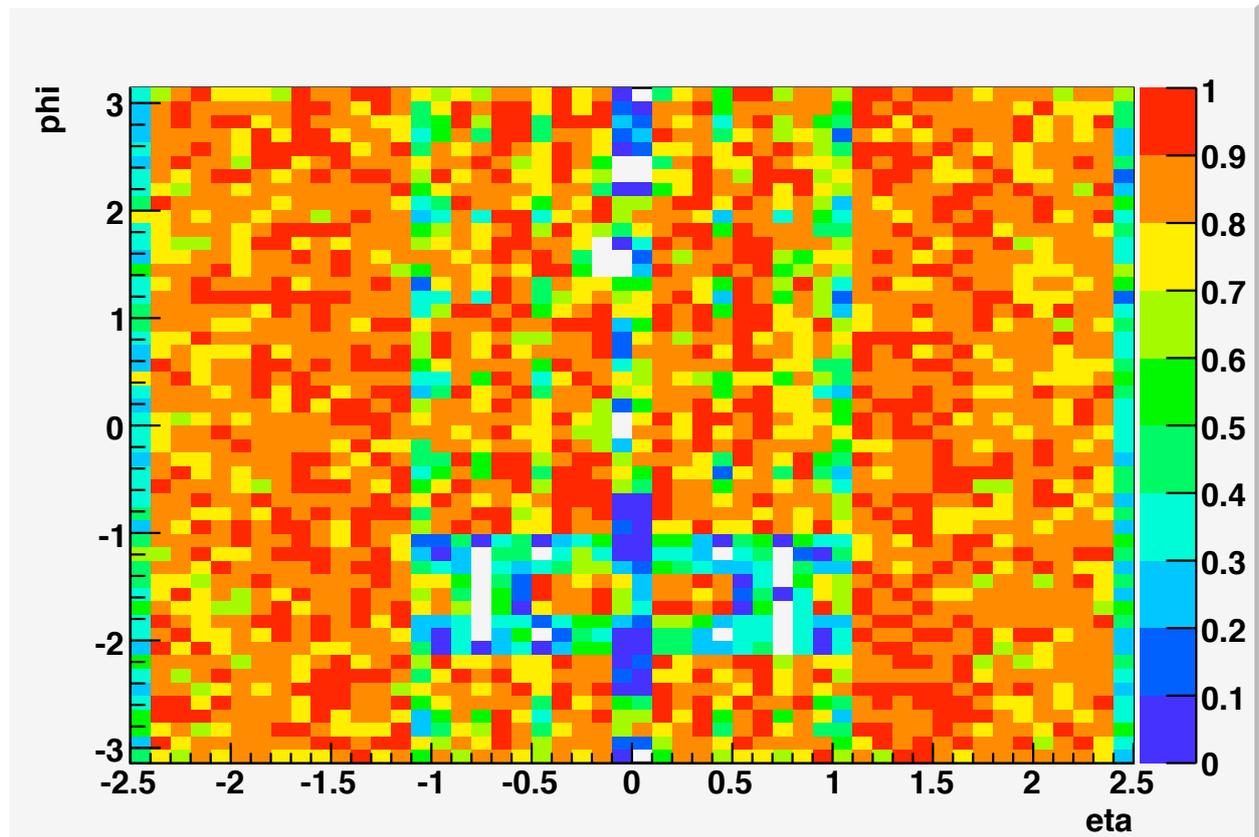


Abbildung 4.5: Einzelmyoneffizienz für Level 1 nach η und ϕ für die 20 GeV Schwelle, statistischer Fehler ca. 0,05

In den weiß markierten Bereichen hat der Level 1 Trigger keine Akzeptanz. Derartige Ineffizienzen finden sich im Fassbereich unter $-2 \leq \phi \leq -1$ (Füße von ATLAS), außerdem in der zentralen η -Region, insbesondere für $\phi = \frac{\pi}{2}$ (Kabel zum Inneren Detektor) und $2, 2 \leq \phi \leq \pi$ (Kühlmittelleitungen zum Kalorimeter).

4.1.2 Triggereffizienzen für Level 2

Die Effizienzbestimmung auf Level2 geschieht analog zu Level1. Hier wird jedem Truth-Myon (ebenfalls per ΔR -Matching) ein passendes MuonFeature-Objekt (vgl. 3.3.2) zugeordnet, das die entsprechende von MuFast rekonstruierte Myonspur sowie die p_T -Abschätzung¹ für Level 2 beinhaltet. Um die Verschärfung der Level 1 Entscheidung durch Level 2 beobachten zu können, werden Myonen, die keinen Level 1 Trigger auslösen konnten, für die Level 2 Effizienzbestimmung außer acht gelassen.

Es ist zu beachten, dass MuonFeature Objekte in der für diese Arbeit verwendeten Athena-Version 12.0.6 nur im Fassbereich zur Verfügung stehen, und damit die Triggereffizienzen auf Level2 nur für Myonen mit $|\eta| \leq 1$ bestimmt werden können.

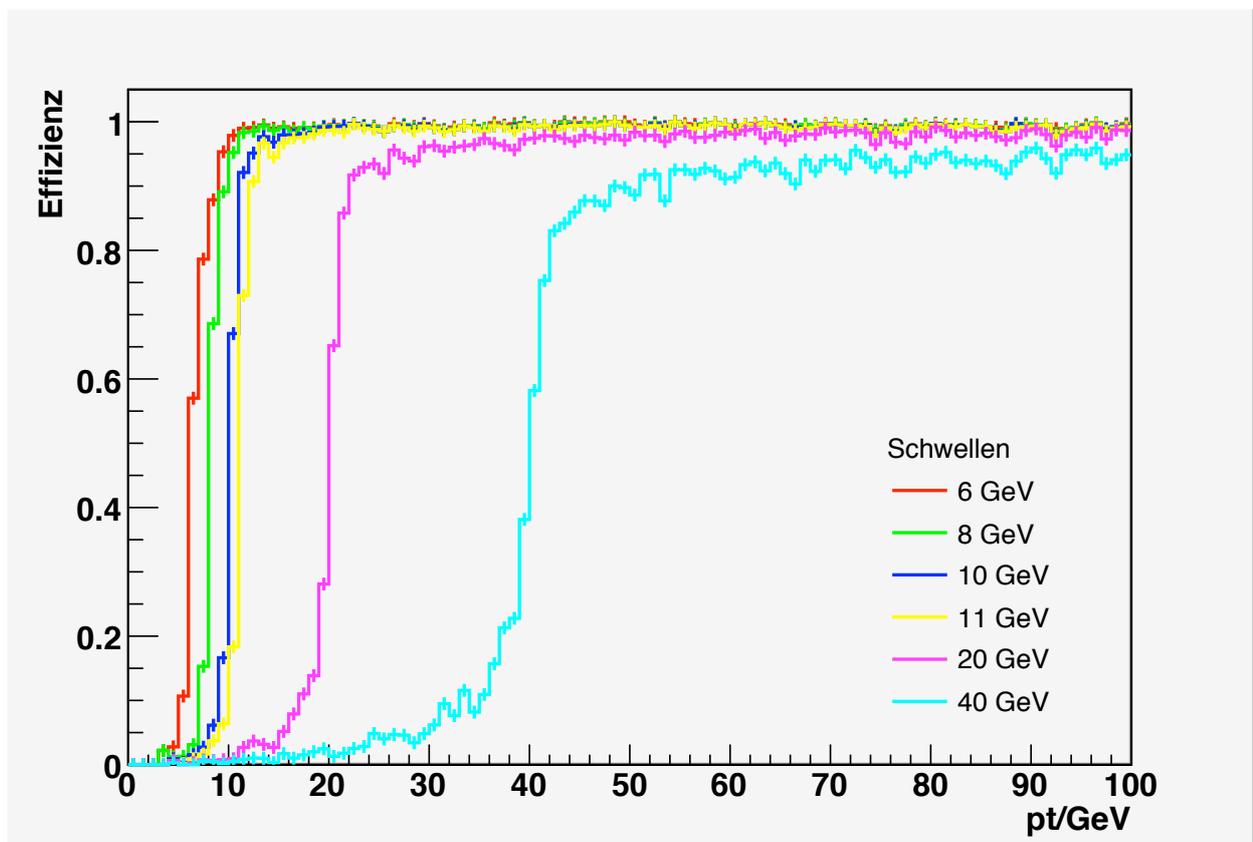


Abbildung 4.6: Einzelmyoneffizienz für Level 2 nach p_T -Schwellen (Fassbereich)

Wie Abbildung 4.6 zeigt, sättigen die meisten Schwellen des Level 2 Triggers im Fassbereich für von Level 1 angenommene Myonen bereits bei einem Transversalimpuls knapp über 10 GeV bei fast 100 % Effizienz. Die Anstiegsflanken der Turn-on-Kurven für die definierten Triggerschwellen fallen durch die Verfeinerung der Transversalimpulsabschätzung gegenüber Level 1 deutlich steiler aus.

¹Die Qualität der MuFast wird in Kapitel 4.1.5 gesondert untersucht.

Einzelmyoneffizienz für Level 2 nach Pseudorapidität η

Für die Darstellung der Level 2 Effizienz nach Pseudorapidität in Abbildung 4.7 wurde ein Myon genau dann als vom Trigger akzeptiert gezählt, wenn dafür ein MuonFeature mit einem ΔR von weniger als 0,1 gefunden werden konnte (unabhängig von dessen p_T -Abschätzung).

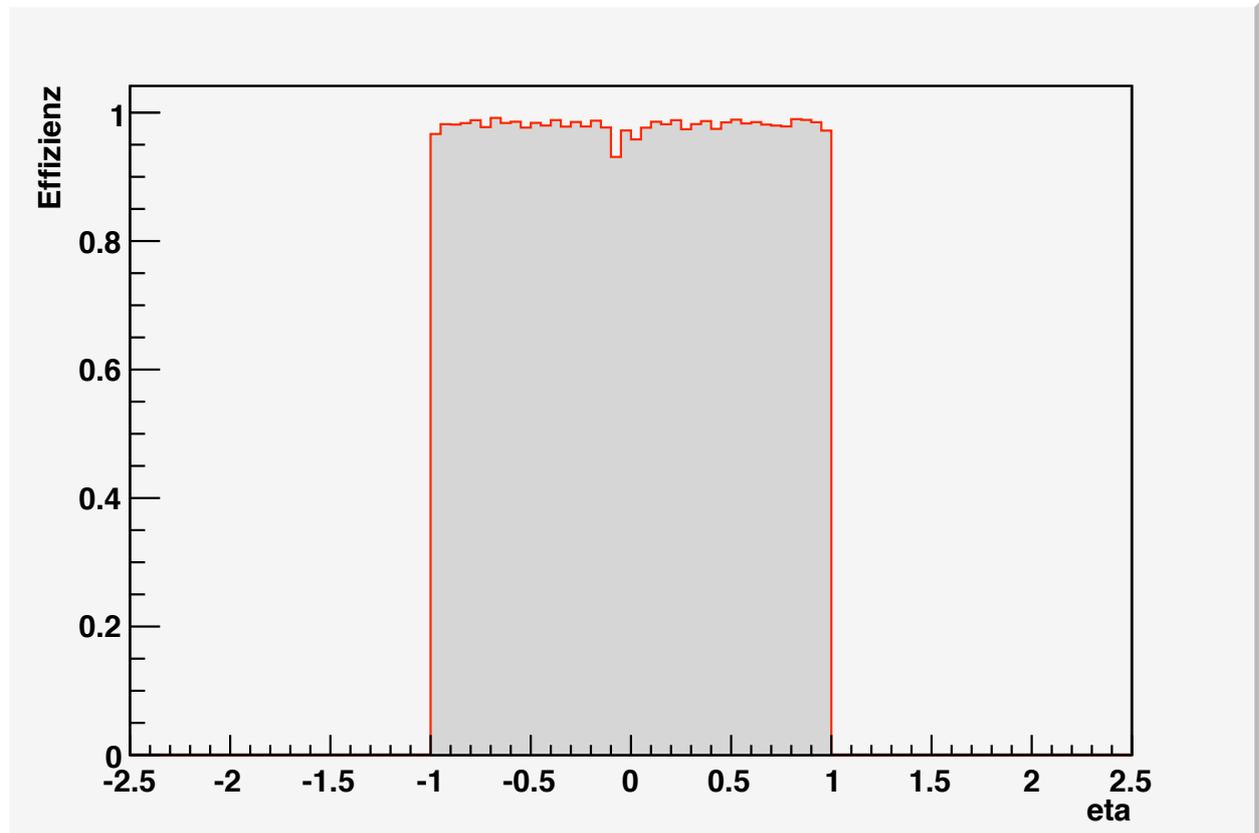


Abbildung 4.7: Einzelmyoneffizienz für Level 2 nach η (Fassbereich), statistischer Fehler ca. 0,01

Level 2 zeigt für Myonen, die eine beliebige Level 1 Schwelle erfüllt haben, im Fassbereich des Detektors eine Effizienz von fast 100%, abgesehen von einer kleinen Lücke im zentralen η -Bereich. Schränkt man die Effizienzbestimmung auf Myonen ein, die auf Level 1 eine p_T -Schwelle von 20 GeV oder 40 GeV ausgelöst haben, erscheint diese Lücke im Verhältnis weniger stark ausgeprägt. Dies lässt den Schluss zu, dass der dortige Effizienzabfall zumindest teilweise auf Myonen zurückzuführen ist, die zwar noch die inneren beiden RPC-Kammern treffen konnten, was für eine Level 1 low- p_T -Schwelle ausreicht, jedoch dann wegen Vielfachstreuung an Kabeln und Versorgungsleitungen keine saubere Spur mehr in den von Level 2 ausgewerteten MDT-Kammern hinterlassen haben.

Einzelmyoneffizienz für Level 2 nach Pseudorapidity η und Azimutwinkel ϕ

Die Effizienz für Level 2 nach Pseudorapidity η und Azimutwinkel ϕ (Abb. 4.8) liegt abgesehen von den bereits unter Kapitel 4.1.1 behandelten Ineffizienzen nahe 100%.

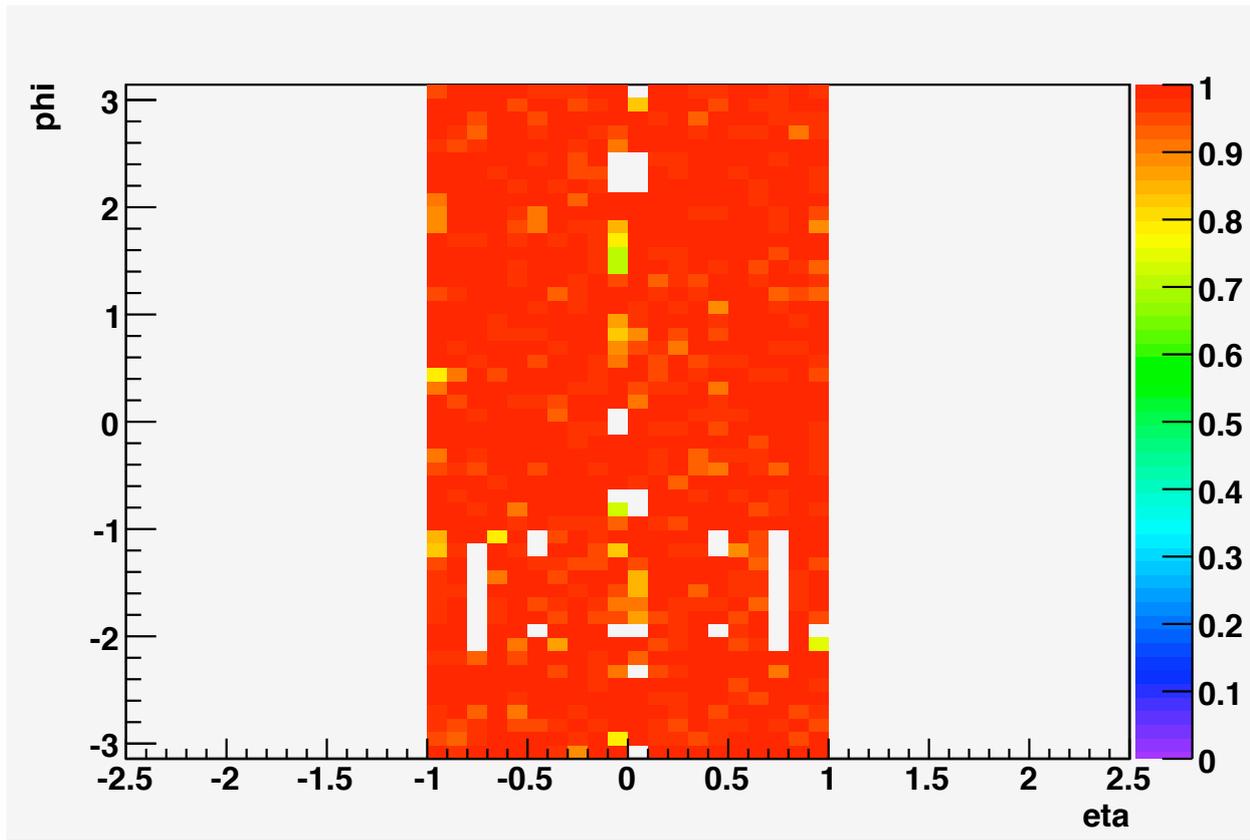


Abbildung 4.8: Einzelmyoneffizienz für Level2 nach η und ϕ (Fassbereich), statistischer Fehler ca. 0,05

In den weiß gefüllten Bereichen hat bereits der Level 1 Trigger keine oder fast keine Akzeptanz, so dass es dort mangels positiver Level 1 Triggerentscheidungen keine Myonen gibt, für die der Level 2 Trigger eine Entscheidung treffen könnte. Über die Effizienz der höheren Triggerstufen in diesen Bereichen ist also keine sinnvolle Aussage möglich.

4.1.3 Triggereffizienzen für Level 3 (Event Filter)

Bei der Effizienzbestimmung für den Event Filter wird auf ähnliche Weise vorgegangen, wie bei Level 2. Für das ΔR -Matching werden nun alle in den TrigMuonEF-Containern enthaltenen Spuren durchsucht. Für diese Analyse wird ein Myon (unabhängig von der p_T -Abschätzung²) genau dann als vom Event Filter akzeptiert gezählt, wenn dafür eine Spur mit einem ΔR von weniger als 0,1 existiert.

Die so entstandene Verteilung wird auf die Verteilung aller von Level2 angenommen Myonen normiert. Für den Übergangs- und Endkappenbereich, wo keine Level 2 Triggerinformation zur Verfügung steht, wird unter Extrapolation des in Kapitel 4.1.2 für den Fassbereich gewonnenen Ergebnisses davon ausgegangen, dass alle von Level1 akzeptierten Myonen auch von Level2 akzeptiert werden.

Einzelmyoneffizienz für Event Filter nach Transversalimpuls p_T

Die Einzelmyoneffizienzen für Event Filter nach Transversalimpuls p_T erreichen einen Plateauwert von ca. 97%. Die Anstiegsflanken der Turn-on-Kurven erscheinen dank der schärferen Impulsauflösung gegenüber Level2 noch steiler.

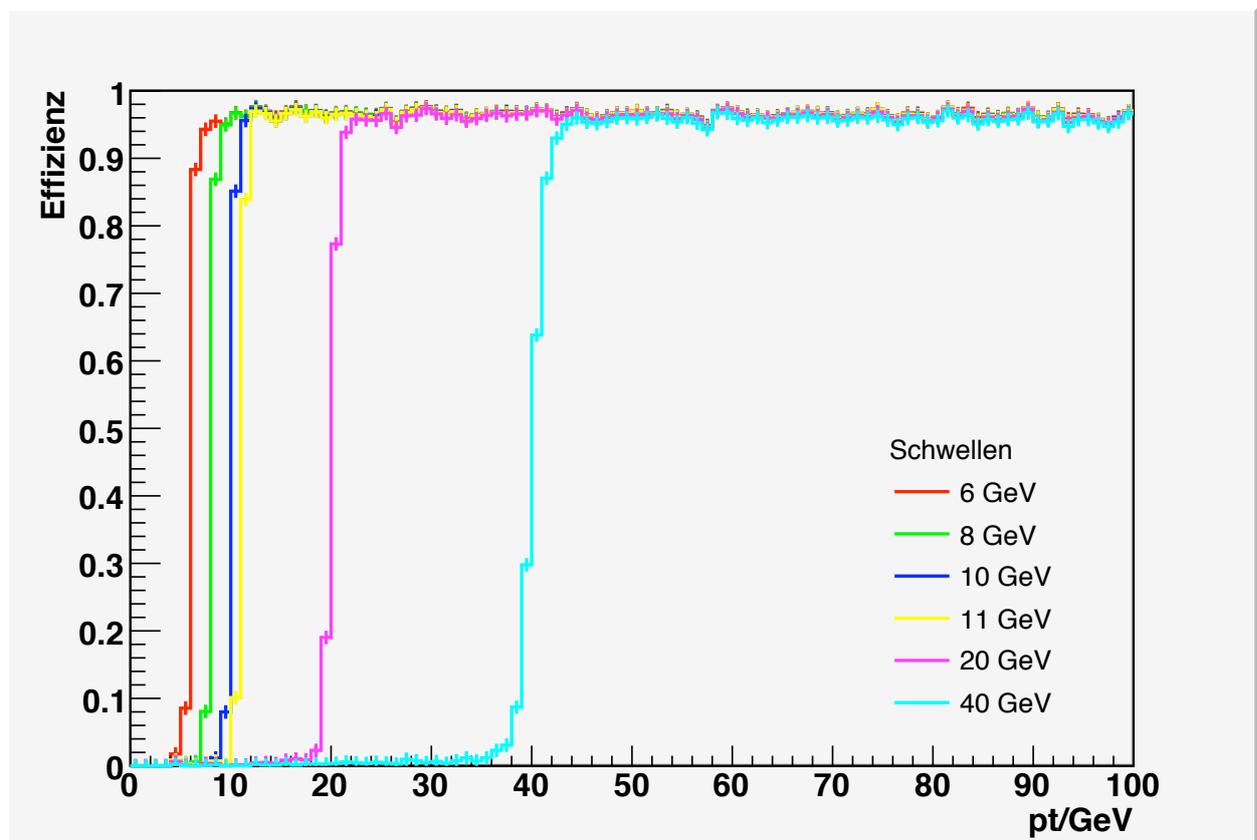


Abbildung 4.9: Einzelmyoneffizienz für Event Filter nach p_T

²Die Güte der Event Filter p_T -Abschätzung wird in Kapitel 4.1.5 untersucht.

Einzelmyoneffizienz für Event Filter nach Pseudorapidität η

Der Grund für die leichte Absenkung des Plateaus für die p_T -Effizienz gegenüber Level 2 lässt sich mit einem Blick auf die Effizienz nach η klären.

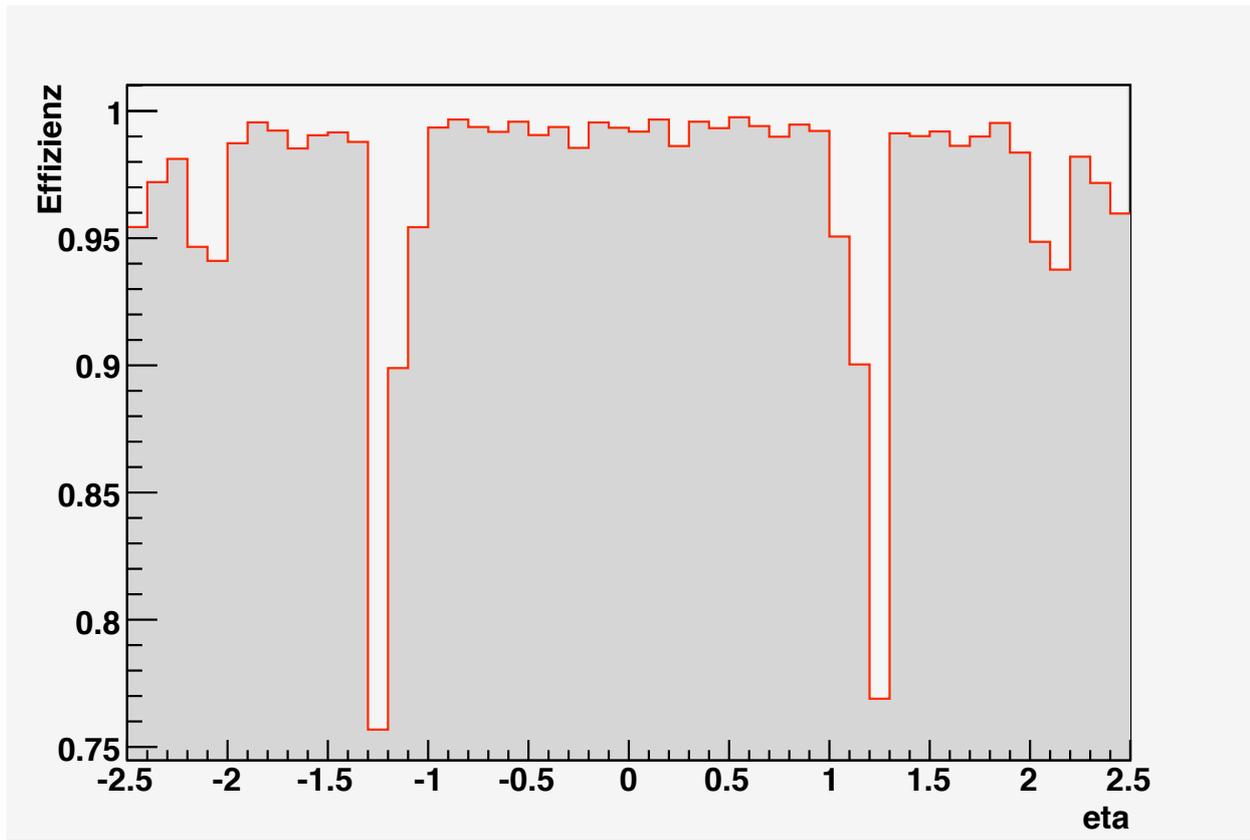


Abbildung 4.10: Einzelmyoneffizienz für Event Filter nach η , statistischer Fehler ca. 0,01

Hier treten an mehreren Stellen niedrigere Effizienzen auf:

- Bei $|\eta| \approx 1,25$ tritt die in Abbildung 4.4 angezeigte Ineffizienz für den Übergang zwischen Fass und Endkappenbereich hervor. Da bereits der Level 2 Trigger auf die Messung aus den MDT-Kammern zurückgreift, wäre diese Lücke vermutlich ebenso wie der Abfall bei $\eta = 0$ schon auf Level 2 zu sehen gewesen, wenn die Level 2 Information außerhalb des Fassbereichs zur Verfügung gestanden hätte. Es liegt die Vermutung nahe, dass die Effizienzkurve des Event Filters gegenüber Level 2 in diesem Fall im Übergangs- und Endkappenbereich ebenso flach verlaufen würde, wie es hier im Fassbereich der Fall ist.
- Für $|\eta| > 2$ steht, wie in Abbildung 4.3 zu sehen ist, in der innersten Lage anstelle einer MDT-Kammer nur noch eine CSC-Kammer zur Verfügung. Der Abfall in der Effizienz fällt geometrisch mit dem Rand der CSC-Kammer zusammen.

Einzelmyoneffizienz für Event Filter nach Pseudorapidität η und Azimutwinkel ϕ

Die Effizienzverteilung für den Event Filter nach η und ϕ (Abb. 4.11) zeigt abgesehen von den eben beschriebenen Ineffizienzen für $|\eta| \approx 1,25$ und $|\eta| \approx 2,1$ im Wesentlichen eine Effizienz von fast 100% für von Level 2 akzeptierte Myonen.

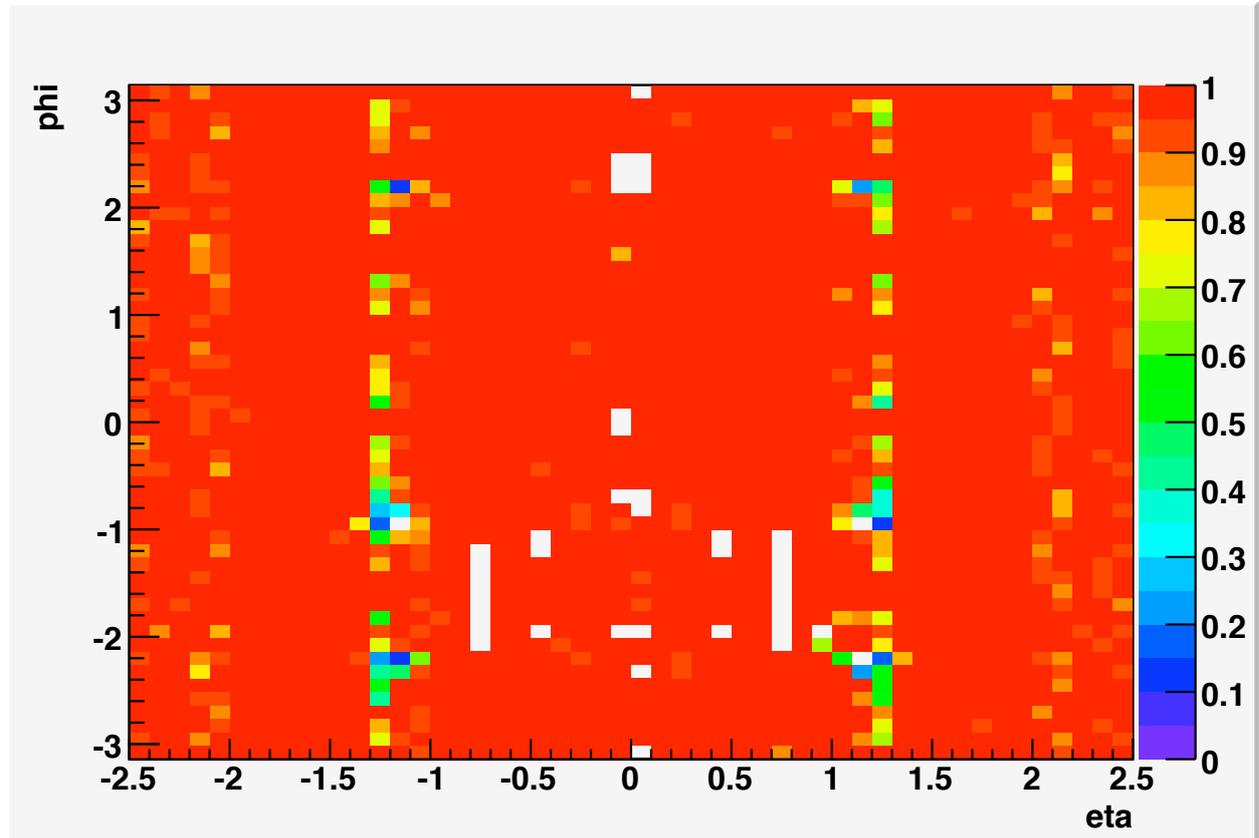


Abbildung 4.11: Einzelmyoneffizienz für Event Filter nach η und ϕ , statistischer Fehler ca. 0,05

Die Ineffizienzen bei $\eta \approx 0$, $|\eta| \approx 0,5$ und $|\eta| \approx 0,7$ sind als weiße Bereiche sichtbar, da hier wiederum keine von Level 1 und Level 2 akzeptierten Myonen vorhanden sind, diese jedoch für eine Aussage über die Effizienz des Event Filters notwendig wären.

Hingegen ist der auf Level 1 noch deutlich erkennbare Bereich mittlerer Effizienz für $|\eta| \approx 1$ auf Event Filter Ebene nicht mehr sichtbar. Hier genügt die Statistik nach Level 1 immer noch für eine fundierte Aussage über die Effizienz der höheren Triggerstufen, die in diesem Bereich für von Level 1 akzeptierte Myonen voll effizient sind.

4.1.4 Ladungsabhängigkeit der Triggereffizienz

Für viele Verfahren (so auch die im nächsten Kapitel 4.2 behandelte Tag & Probe Methode) und Physikanalysen (wie z.B. die Suche nach Leptoquarks, siehe Kapitel 4.3.4) spielen Zerfallskanäle mit unterschiedlich geladenen Myonen eine Rolle. Bei der bisherigen Betrachtung des Triggers wurde stillschweigend davon ausgegangen, dass sich dieser für positive und negative Myonen gleich verhält. Im Folgenden wird diese Annahme überprüft, indem Triggereffizienzen für positive und negative Myonen getrennt bestimmt und anschließend im Verhältnis zur Gesamteffizienz betrachtet werden.

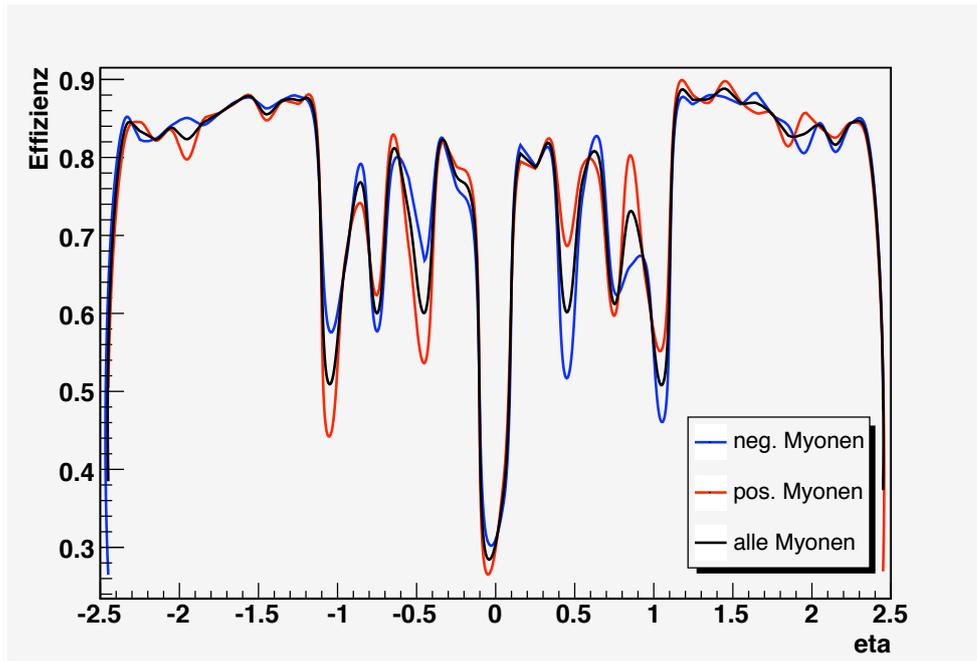


Abbildung 4.12: Einzelmyoneffizienz für Level 1 nach Ladung und η für die 20 GeV Schwelle, statistischer Fehler ca. 0,01

Abbildung 4.12 zeigt die Effizienzverteilungen für die 20 GeV Schwelle auf Level 1 nach Pseudorapidität. Bereits hier ist zu sehen, dass die für positive und negative Myonen separat bestimmten Verteilungen vor allem nahe den in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Bereichen von Ineffizienz merklich voneinander abweichen.

Um diesen Effekt quantifizieren zu können, wurden für Abbildung 4.13 die Level 1 Effizienzen für positive und negative Myonen (exemplarisch für die 20 GeV Schwelle) auf die Level 1 Gesamteffizienz normiert.

Bei einem Fehler von weniger als 3 % zeigen sich statistisch signifikante Abweichungen. So liegt z.B. bei $\eta \approx +0,5$ die Effizienz der positiven Myonen um ca. 28 % über der Gesamteffizienz. Bei $\eta \approx -0,5$ zeigt sich der umgekehrte Fall: Die Effizienz für positive Myonen liegt dort um ca. 25 % unter der Gesamteffizienz. Weitere Unterschiede können bei $|\eta| = 0,8$, $|\eta| = 1,2$ und $|\eta| = 2,0$ festgestellt werden. An diesen Stellen befinden sich die in Kapitel 4.1.1 festgestellten Akzeptanzlücken. Da die Bahn der Myonen je nach Ladung

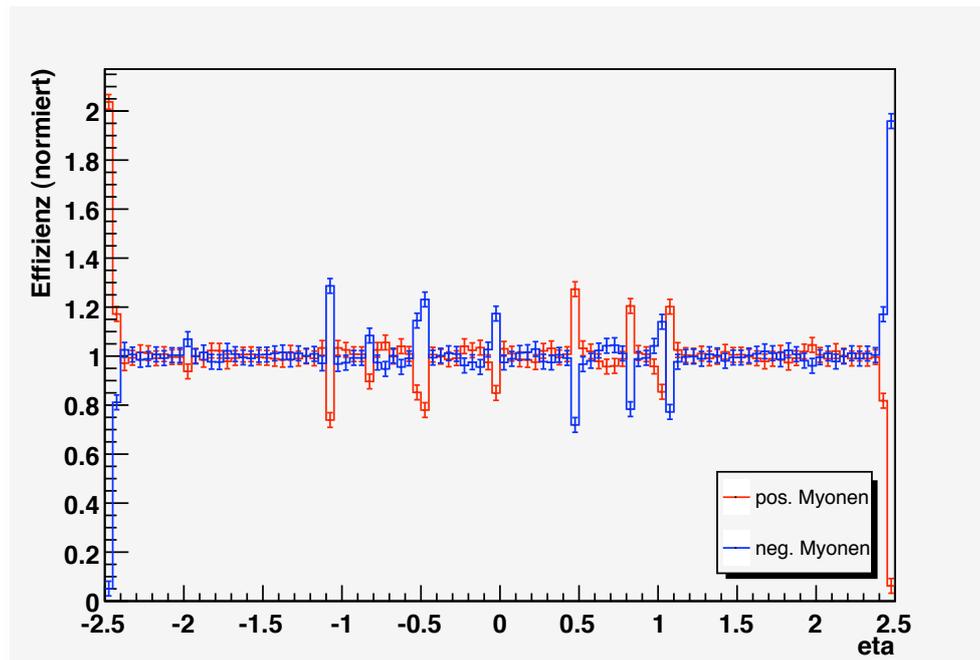


Abbildung 4.13: Einzelmyoneffizienz für Level 1 nach Ladung und η (20 GeV Schwelle) normiert auf die Effizienz für alle Myonen

eine entgegengesetzte Krümmung aufweist (vgl. Abb. 2.1), wirken sich diese Lücken auf die Effizienz für positive und negative Myonen unterschiedlich aus.

An den äußeren Rändern des Akzeptanzbereichs werden vom Magnetfeld jeweils nur noch die Bahnen von Myonen einer Ladungsart in den Akzeptanzbereich der RPCs hineingebogen.

Auf Level 2 zeigen sich kaum signifikante Effizienzunterschiede für vom Level 1 akzeptierte positive und negative Myonen (vgl. Abb. 4.14). Die Rekonstruktionseffizienz auf Level 2 wird lediglich im zentralen η -Bereich ein wenig durch die Teilchenladung beeinflusst.

Auf Event Filter Ebene zeigen sich im Fassbereich gegenüber Level 2 keine signifikanten Effizienzunterschiede mehr, wie Abbildung 4.15 zeigt. Außerhalb des Fassbereichs ist in Abbildung 4.15 (wegen fehlender Level 2 Triggerinformation) die Änderung gegenüber Level 1 dargestellt. Hier zeigen sich wieder genau dort Abweichungen, wo bereits bei der Gesamteffizienz (vgl. Kapitel 4.1.3) Lücken zu sehen waren.

Es ist also festzustellen, dass nahe den Lücken in der geometrischen Akzeptanz des Detektors die genaue Teilchenbahn und damit Ladung der Myonen einen Einfluss auf die Triggereffizienz hat. Dies muss bei der Auswertung der ATLAS-Messdaten berücksichtigt werden.

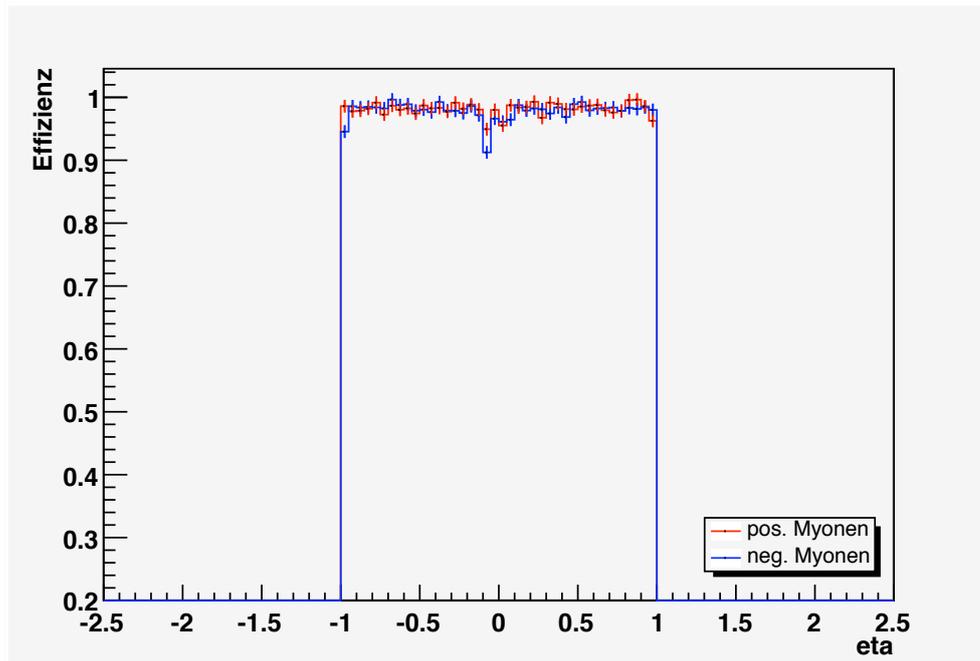


Abbildung 4.14: Einzelmyoneffizienz für Level 2 nach Ladung und η (Fassbereich)

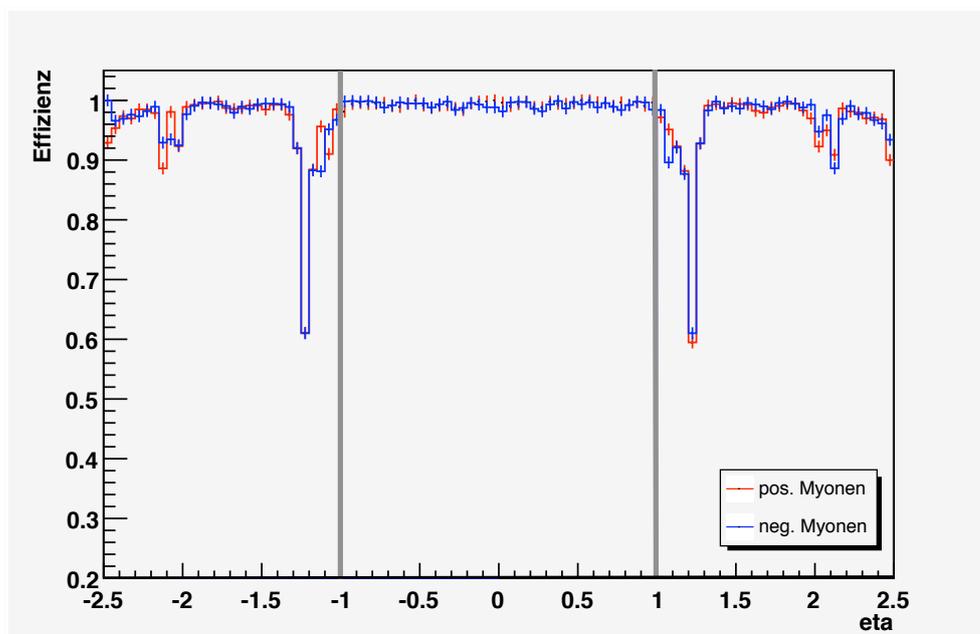


Abbildung 4.15: Einzelmyoneffizienz für Event Filter nach Ladung und η , für $|\eta| < 1$ gegenüber Level 2, für $|\eta| > 1$ gegenüber Level 1

4.1.5 Auflösung der Level 2 / Event Filter p_T -Abschätzung

In den vorhergehenden Kapiteln hat sich gezeigt, dass (zumindest für Einzelmyonen) die Anstiegsflanken der Turn-on-Kurven für die Effizienzen nach p_T mit jeder neuen Triggerstufe steiler ausfallen. Dies wurde auf eine bessere Impulsauflösung zurückgeführt. Um die Güte dieser Impulsmessungen auch quantitativ beurteilen zu können, werden im Folgenden die Auflösungen der auf Level 2 bzw. Event Filter Ebene zur Verfügung stehenden p_T -Abschätzungen für den vorliegenden Einzelmyonen-Datensatz angegeben und mit der Auflösung des Myonspektrometers verglichen.

Die normierte p_T -Abweichung für jede rekonstruierte Spur ist durch

$$\rho := \frac{\frac{1}{p_T^{Truth}} - \frac{1}{p_T^{Reco}}}{\frac{1}{p_T^{Truth}}} = 1 - \frac{p_T^{Truth}}{p_T^{Reco}} \quad (4.1)$$

gegeben und wird histogrammiert.

Man erwartet eine Gaußverteilung für $\frac{1}{p_T}$ (nicht für p_T , denn $p \sim \frac{1}{s}$ wird aus gemessenem Sagitta s berechnet). Die p_T -Auflösung selbst ist in [19] wie folgt definiert: Zunächst wird eine Gauß-Funktion g_0 an das Histogramm angepasst. Anschließend passt man eine weitere Gauß-Funktion g_i an die Messdaten in einem Intervall von zwei Standardabweichungen um den Mittelwert von g_{i-1} an. Dies wird n -mal wiederholt, wobei die Praxis zeigt, dass bereits zwei Iterationen für einen stabilen Fit ausreichen. Die Standardabweichung der letzten Gauß-Funktion wird als p_T -Auflösung definiert.

Tabelle 4.1 zeigt das Ergebnis der Auflösungsbestimmung. Dabei wurden für alle im Datensatz vorhandenen Myonen jeweils die normierten p_T -Abweichungen für die MuonFeature-Abschätzung (Abb. 4.16), die TrigMuonEF-Abschätzung (Abb. 4.17) und rekonstruierten Impulse (Abb. 4.18) histogrammiert und das zuvor beschriebene Verfahren angewandt.

Messung	Auflösung	Mittelwert
Level 2 (MuonFeature, Fassbereich)	3,8%	0,00
Event Filter (TrigMuonEF)	2,7%	0,00
Myonspektrometer (rekonstruierter p_T)	2,7%	0,00

Tabelle 4.1: Ergebnis der p_T -Auflösungsbestimmung für Level 2, Event Filter und Myonspektrometer bei Einzelmyonen, p_T gleichverteilt zwischen 0 GeV und 100 GeV

Während Level 2 mit 3,8% noch eine etwas gröbere Auflösung liefert, bietet der Event Filter mit 2,7% bereits die Auflösung der vollen Myonspektrometer-Rekonstruktion. Die Mittelwerte von 0,00 zeigen an, dass keine Tendenz bezüglich Über- oder Unterschätzung des Transversalimpulses vorliegt.

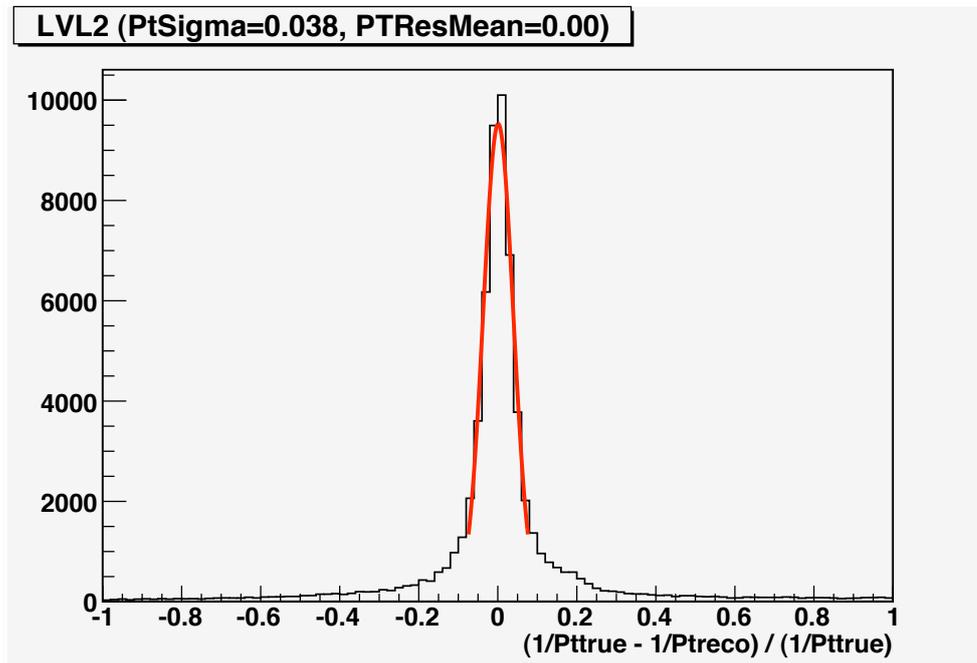


Abbildung 4.16: Auflösungsbestimmung der Level 2 (muFast) p_T -Abschätzung (jeweils MuonFeature mit kleinstem ΔR , nur Fassbereich)

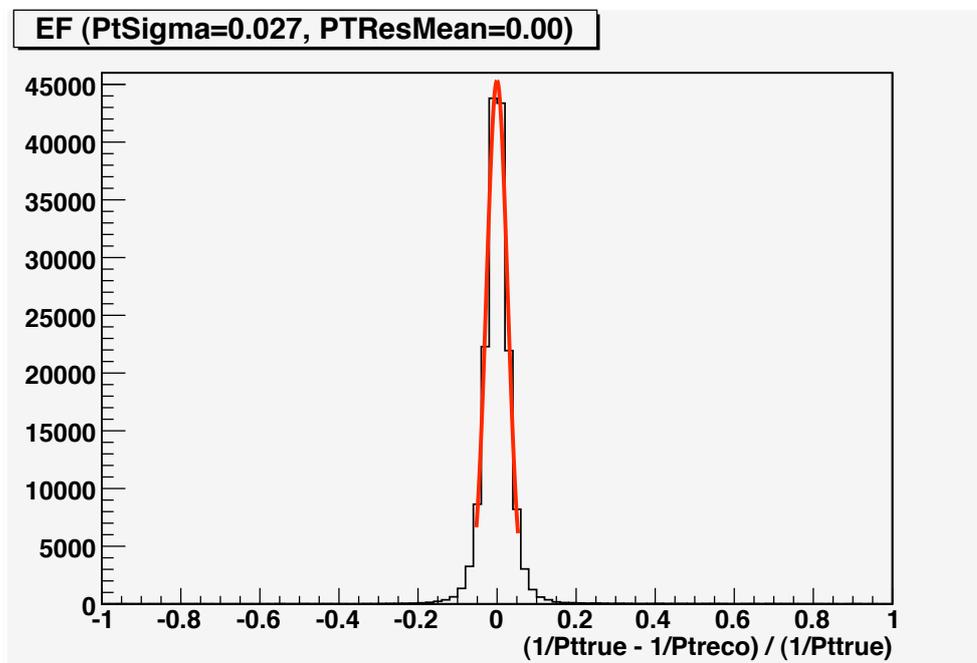


Abbildung 4.17: Auflösungsbestimmung der Event Filter p_T -Abschätzung (jeweils TrigMuonEF-Spur mit kleinstem ΔR)

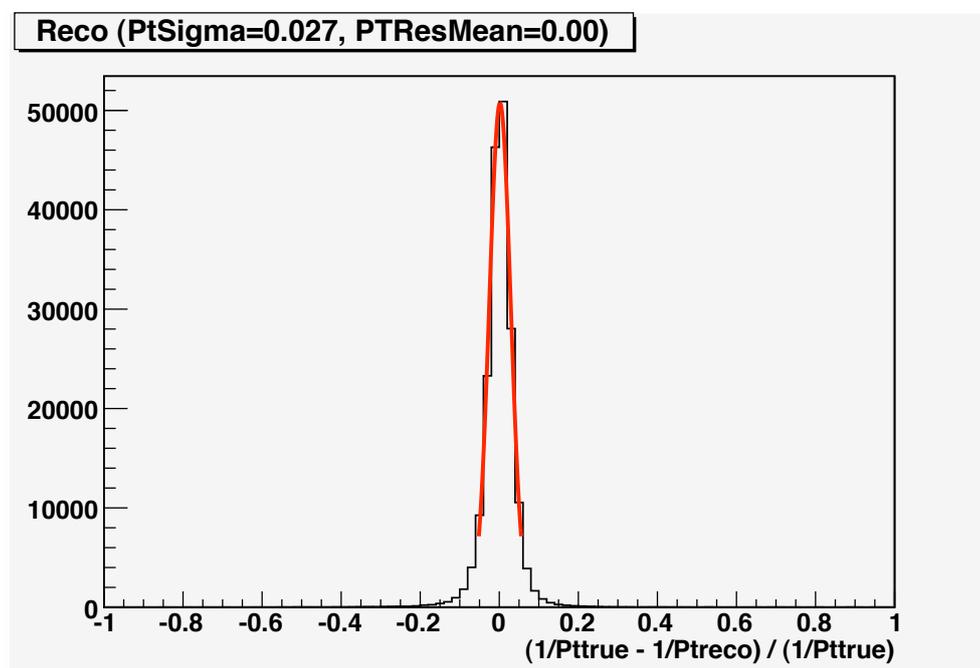


Abbildung 4.18: Auflösungsbestimmung der Myonspektrometer p_T -Messung (rekonstruierter Transversalimpuls)

4.2 Bestimmung von Myontriggereffizienzen mit der Tag & Probe Methode

Im wirklichen Detektorbetrieb ist es (leider) nicht möglich, Triggereffizienzen unter Zuhilfenahme der Truth-Information zu ermitteln, so wie es in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben wurde. Es gibt jedoch Methoden zur Effizienzbestimmung, die ausschließlich auf Informationen zurückgreifen, die auch in echten rekonstruierten Daten zur Verfügung stehen.

Eine Möglichkeit ist, Daten zu benutzen, die von einem myonunabhängigen Trigger (beispielsweise einem Elektron- oder Jettrigger) selektiert wurden, und dann nachzusehen, wie oft ein rekonstruiertes Myon einen bestimmten Myontrigger ausgelöst hat. Eine andere Möglichkeit nutzt Ereignisse mit mindestens zwei hochenergetischen Myonen und ist als *Tag & Probe*-Methode bekannt.

Der Zugriff auf echte Daten beschränkt sich auf Ereignisse, die mindestens eine Triggerbedingung erfüllen. Diese Vorauswahl kann sich jedoch auf die Effizienzbestimmung auswirken. Mit Hilfe der Tag & Probe-Methode kann dieses Problem umgangen werden. Man benutzt hierbei Ereignisse mit mindestens zwei hochenergetischen Myonen, wie z.B. den myonischen Zerfall des Z -Bosons. Man wählt ein aus einem Z -Zerfall stammendes Myon als Markierung (*Tag*) und das dazugehörige zweite Myon als Sonde (*Probe*). Erfüllt das Tag-Myon die Triggerbedingung, so wird nun überprüft, wie oft das zweite Myon (Probe-Myon) einen Myontrigger auslöst. Anschließend wird die Prozedur unter Vertauschung von Tag-Myon und Probe-Myon einmal wiederholt (vgl. [19]).

Für diese Analyse werden zwei Myonen genau dann für die Anwendung der Tag & Probe Methode ausgewählt, wenn sie den folgenden Anforderungen genügen:

- Transversalimpuls jeweils über 6 GeV
- entgegengesetzte Ladung
- gemeinsame invariante Masse in einem Intervall von 15 GeV um die Masse³ des Z -Bosons (90 GeV)

Stand bei der Analyse der Einzelmyonen noch die Frage nach der Triggerentscheidung der einzelnen Stufen im Vordergrund, so stellt sich nun vorrangig die Frage nach dem verbleibenden Anteil an hochenergetischen Myonen nach Level 1, Level 2 bzw. Event Filter. Um diese Frage beantworten zu können, werden die gewonnenen Verteilungen jeweils auf die Gesamtverteilung aller für die Anwendung der Tag & Probe Methode selektierten Myonen normiert, anstatt wie bei der Analyse der Einzelmyonen auf die Ausgabe der vorangegangenen Triggerstufe.

Abbildung 4.19 zeigt die p_T -Effizienzkurven für Level 1, Level 2 und Event Filter. Für die Wertung als vom Trigger akzeptiert genügt hier bereits das Vorhandensein eines zu den

³In dieser Arbeit werden Teilchenmassen, wie in der Teilchenphysik üblich, in GeV angegeben, da bei vernachlässigbarer Ruheenergie Massen als Energie/ c^2 angeben werden können und die Lichtgeschwindigkeit c in einem geeigneten Einheitensystem $= 1$ gesetzt werden kann.

η - und ϕ -Werten des Probe-Myons passenden LVL1_ROI, MuonFeature bzw. TrigMuonEF Objekts. Da für den Endkappenbereich keine Level 2 Triggerinformation verfügbar ist, wird die Level 2 Entscheidung dort gleich der Level 1 Entscheidung gesetzt. Dies hat zur Folge, dass die Kurven für Level 1 und Level 2 fast aufeinander liegen.

Anstieg und Plateau sind deutlich zu erkennen. Aufgrund der hauptsächlich um 40 GeV verteilten Transversalimpulse der Myonen (vgl. Anhang, Abb. A.5), steigt allerdings der Fehler aufgrund sinkender Statistik für große und kleine p_T schnell von ca. 0.5 % auf ca. 5 % an. Für die tatsächliche Bestimmung von Triggereffizienzen am ATLAS Detektor mit Tag & Probe wird mangelnde Statistik jedoch aller Voraussicht nach kein Problem darstellen. Der Zerfall von Z -Bosonen in zwei Myonen hat einen Wirkungsquerschnitt von 1497 pb (vgl. [19]), das entspräche bei einer instantanen Luminosität von $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ einer Rate von ca. 15 Ereignissen pro Sekunde, so dass nach einer Woche bereits um die fünf Millionen Ereignisse als Grundlage für die Effizienzbestimmung zur Verfügung stünden.

Abbildung 4.20 zeigt die mit der Tag & Probe Methode bestimmte Effizienzkurve nach Transversalimpuls p_T für Level 1 im Vergleich zu der in Kapitel 4.1.1 gewonnenen entsprechenden Kurve für die Einzelmyoneffizienz. Es fällt auf, dass beide Kurven zwar in Anstieg und Plateau relativ gut übereinstimmen, sich jedoch dazwischen unterscheiden. Die niedrigeren Effizienzen für kleinere p_T -Werte bei Tag & Probe können jedoch verstanden werden. Ein Blick auf die zugrundeliegende Verteilung der Myontransversalimpulse und Pseudorapiditäten (im Anhang, Abb. A.7) zeigt, dass Myonen mit kleineren Transversalimpulsen dort tendenziell höhere Pseudorapiditäten haben. Wie man in den unter den gleichen Bedingungen gewonnenen η -Effizienzkurven für Level 1, Level 2 und Event Filter in Abbildung 4.21 sehen kann, sind dort die Triggereffizienzen niedriger.

Da für den Endkappenbereich keine Level 2 Triggerinformation verfügbar ist, liegen dort die Kurven für Level 1 und Level 2 für $|\eta| > 1$ aufeinander. Es zeigen sich die selben Ineffizienzbereiche wie bei der Analyse der Einzelmyonen (vgl. Kapitel 4.1.1).

Die Effizienz für den Event Filter nach η und ϕ (siehe Abb. 4.22) liefert eine Effizienzübersicht nach Durchlaufen aller drei Triggerstufen. In den rot gekennzeichneten Bereichen „überleben“ über 90% der Myonen alle drei Triggerstufen. In den weiß gefüllten Bereichen hat die Kombination aus allen drei Triggerstufen keine Akzeptanz. Gut lässt sich auch eine achteilige Struktur niedrigerer Effizienzen unter $|\phi| = n \cdot \frac{\pi}{8}$ im Fassbereich erkennen, die den im Schnitt durch das Myonspektrometer (Abb. 1.5) sichtbaren Toroidspulen zugeordnet werden kann.

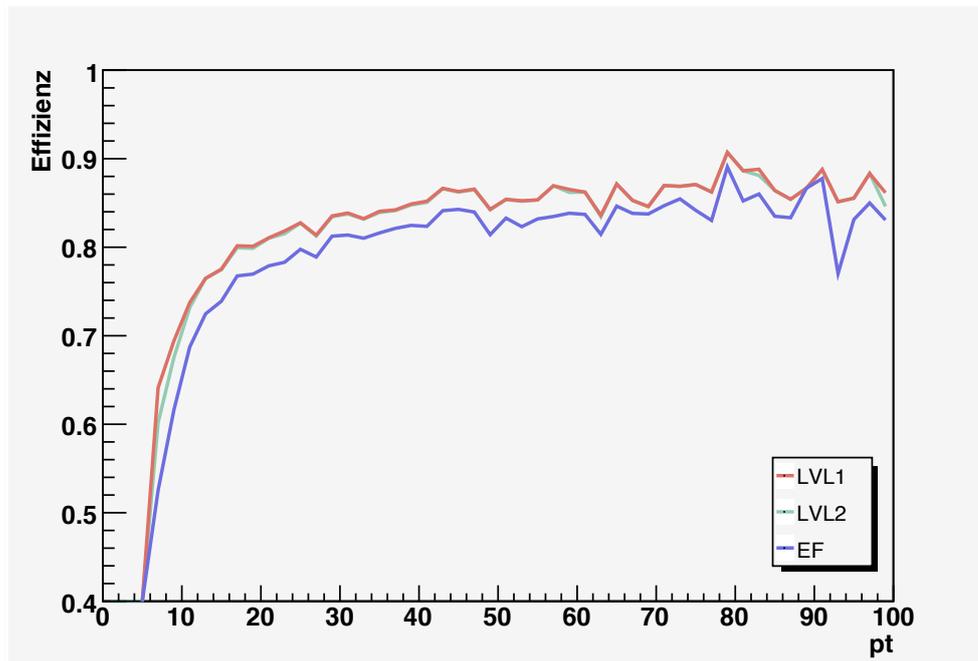


Abbildung 4.19: Triggereffizienzen aus Tag & Probe nach Transversalimpuls p_T für Level 1, Level 2 und Event Filter

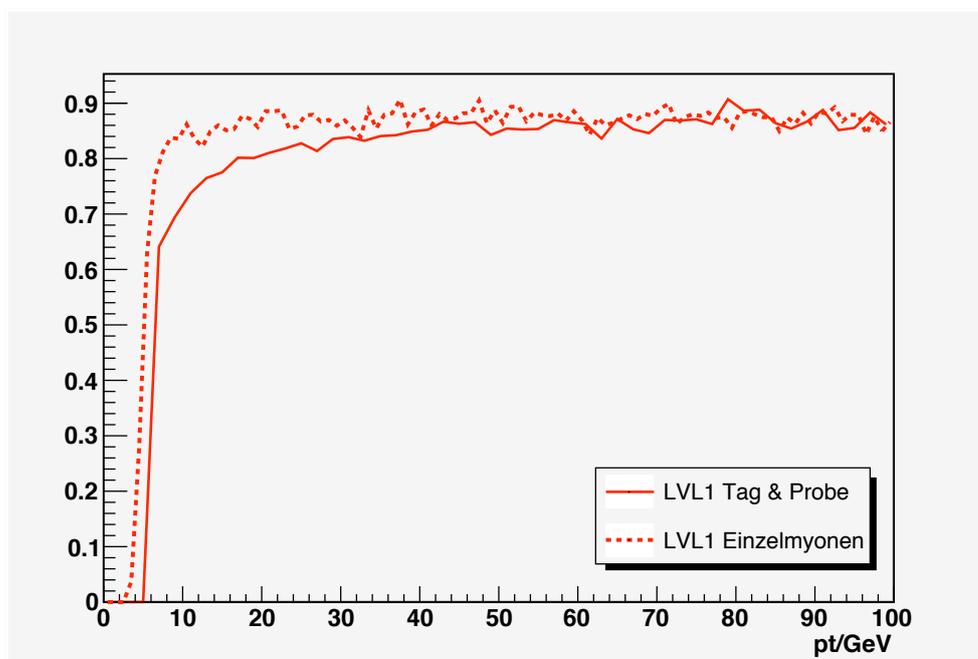


Abbildung 4.20: Triggereffizienzen für Level 1 aus Tag & Probe und Einzelmyonen nach Transversalimpuls p_T

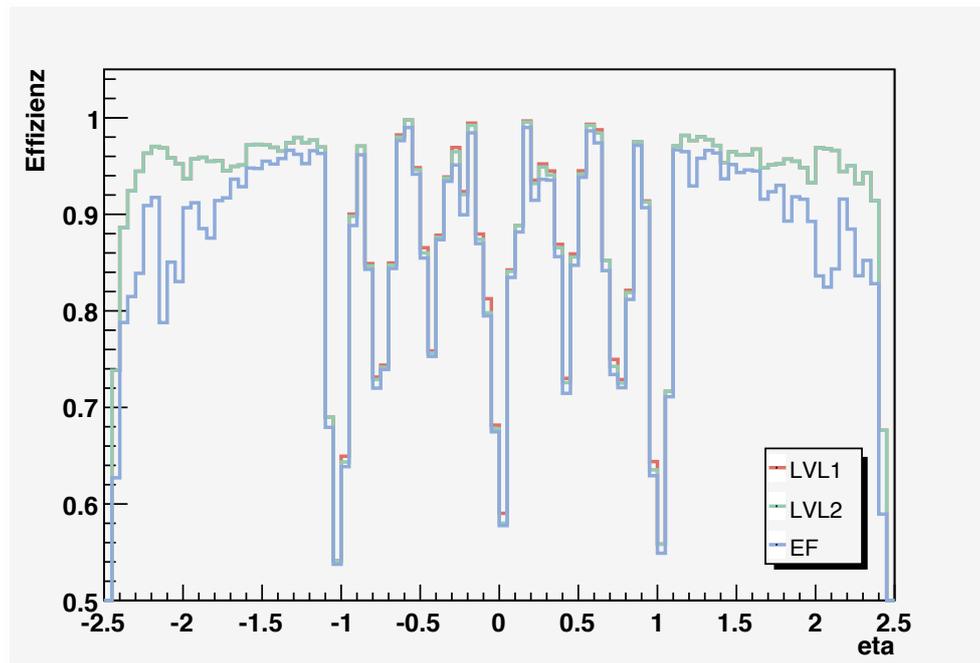


Abbildung 4.21: Triggereffizienzen aus Tag & Probe nach Pseudorapidität η , statistischer Fehler ca. 2%

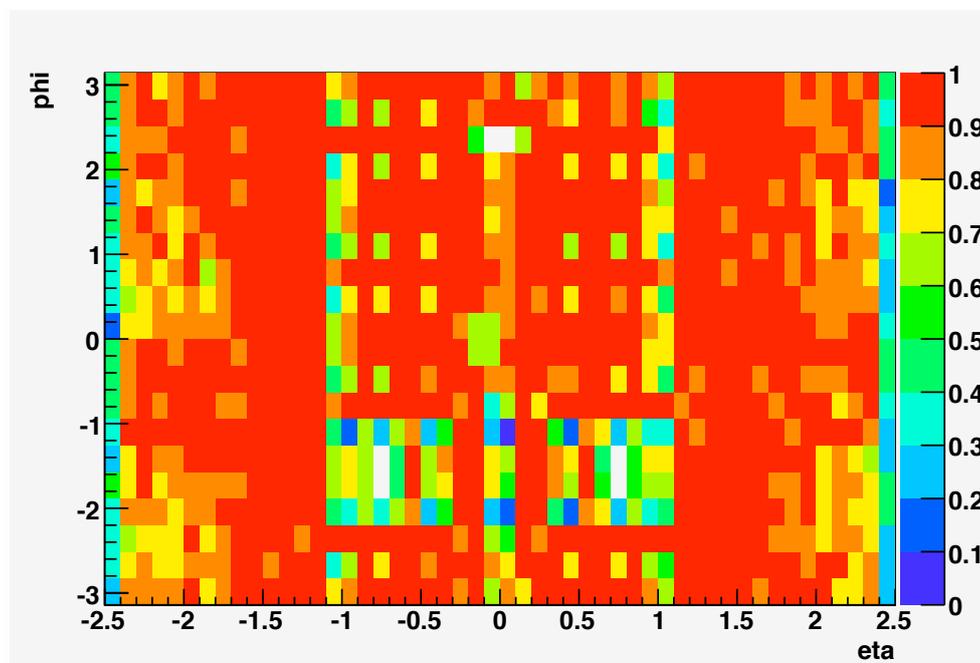


Abbildung 4.22: Triggereffizienzen aus Tag & Probe nach Pseudorapidität η und Azimutwinkel ϕ , Event Filter, statistischer Fehler ca. 5 %

4.3 Studien zur Effizienz von Myon- und Dimyontriggersignaturen

In den vorangegangenen Kapiteln wurde ausschließlich das Verhalten des Triggers für den Nachweis von einzelnen Teilchen betrachtet. Für das Triggering im wirklichen Detektorbetrieb werden jedoch Schwellen zu Triggersignaturen und Triggersignaturen zu einem Triggermenü kombiniert, um damit nicht nur einzelne Teilchen, sondern vielmehr Ereignisse zu selektieren. Auf den folgenden Seiten wird der Versuch unternommen, die Entscheidungen des vorliegenden Triggermenüs „CSC06“ (vgl. Kapitel 3.3.4) für die dort definierten Einzelmyontriggersignaturen nachzuvollziehen, um anschließend die Möglichkeit zu haben, Triggersignaturen für zwei Myonen zu bilden und einen Näherungswert für deren mögliche Effizienz anzugeben.

4.3.1 Triggersignaturen für Einzelmyonen

Wie in Kapitel 3.3.4 beschrieben, enthält das TriggerDecision Objekt die Triggerentscheidungen aufgeschlüsselt nach den einzelnen Triggersignaturen. Das TriggerDecision-Objekt wird von einem Algorithmus namens TriggerDecisionMaker (vgl. [20]) gefüllt, der wiederum die Liste der erfüllten Signaturen vom *Region of Interest Builder* (sammelt die Daten aus dem LevelTrigger und setzt diese zusammen, vgl. [21]) und den Objekten *L2Result* für Level2 und *EFresult* für den Event Filter bezieht. Da die genauen Entscheidungsgrundlagen für L2Result und EFResult nicht in AOD-Daten verfügbar sind, wird im Folgenden versucht, diese Entscheidungen nachzubilden, indem man für jedes Ereignis die p_T -Abschätzung der vorhandenen LVL1_ROI, MuonFeature und TrigMuonEF Objekte (vgl. Kapitel 3.3) nach den Standardschwellen (6, 8, 10, 11, 20, 40 GeV) auswertet. Das Ergebnis kann dann mit der Entscheidung der korrespondierenden Signatur aus dem TriggerDecision Objekt verglichen werden.

Für die Definition von Triggerschwellen sind prinzipiell zwei Möglichkeiten denkbar:

- *exklusive Definition*: Zu einer Schwelle werden jeweils Myonkandidaten mit einem Transversalimpuls *zwischen dieser und der nächsthöheren Schwelle* gerechnet (z.B. „MU06“ : Myonkandidat mit $6 \text{ GeV} \leq p_T < 8 \text{ GeV}$)
- *inklusive Definition*: Zu einer Schwelle werden jeweils *alle* Myonkandidaten mit einem Transversalimpuls *über dieser Schwelle* gerechnet (z.B. „mu06“ : Myonkandidat mit $p_T \geq 6 \text{ GeV}$)

In Tabelle 4.2 wird für den bereits bei der Bestimmung der Einzelmyonen-Effizienz benutzten Datensatz⁴ die Triggerentscheidung aus dem TriggerDecision Objekt mit der aus der Auswertung der LVL1_ROI, MuonFeature und TrigMuonEF Objekte gewonnenen Triggerentscheidung in inklusiver und exklusiver Definition verglichen. Für jede Triggersignatur ist jeweils die Anzahl der akzeptierten Ereignisse gegeben, normiert auf die Gesamtzahl aller Ereignisse im Datensatz (in diesem Fall 200.000).

⁴Einzelmyonen, $0 \text{ GeV} < p_T \leq 100 \text{ GeV}$, gleichverteilt in p_T , η , ϕ , vgl. Kapitel 4.1

Stufe	Triggerschwelle	TriggerDecision	exkl. Definition	inkl. Definition
LVL1	MU06	1,1 %	1,0 %	82,5 %
	MU08	1,0 %	1,0 %	81,5 %
	MU10	3,2 %	3,0 %	80,6 %
	MU11	4,6 %	4,6 %	77,5 %
	MU20	7,7 %	7,6 %	73,0 %
	MU40	65,6 %	65,3 %	65,3 %
LVL2	mu06	80,7 %	1,2 % (Fass)	73,3 % (Fass)
	mu08	-	1,6 % (Fass)	72,1 % (Fass)
	mu10	-	0,8 % (Fass)	70,5 % (Fass)
	mu11	-	7,6 % (Fass)	70,0 % (Fass)
	mu20	66,1 %	17,0 % (Fass)	62,0 % (Fass)
	mu40	-	45,0 % (Fass)	45,0 % (Fass)
EF	mu06	76,8 %	1,4 %	78,8 %
	mu08	-	1,6 %	77,4 %
	mu10	-	0,8 %	75,8 %
	mu11	-	7,6 %	75,0 %
	mu20	62,2 %	17,3 %	67,5 %
	mu40	-	50,3 %	50,3 %

Tabelle 4.2: Effizienzen für Singlemyontriggersignaturen bei Einzelmyonen, die Effizienz für die exkl./inkl. Level 2 Definition berücksichtigt nur Ereignisse, bei denen ausschließlich Myonen im Fassbereich auftreten. Statistischer Fehler ca. 0,1 %, für Level 2 ca. 1 %.

Auf Level 1 stimmen die Effizienzen für TriggerDecision und die exklusive Definition für den Einzelmyonen-Datensatz besser als 1 % überein. Die „offiziellen“ Signaturen auf Level 1 sind also exklusiv definiert.

Auf Level 2 sind die Effizienzen nicht auf diese Weise vergleichbar. Da die Level 2 Triggerinformation (MuonFeature) nur im Fassbereich des Detektors verfügbar ist, werden für die Effizienzbestimmung der Nachbildung nur Ereignisse herangezogen, bei denen keine Myonen außerhalb des Fassbereiches ($|\eta| \leq 1$) auftreten. Da sich die TriggerDecision jedoch auf den kompletten Detektor bezieht, sind die angegebenen Effizienzen nur innerhalb der TriggerDecision bzw. innerhalb der Nachbildung vergleichbar. Das Verhältnis der Effizienzen von „mu06“ und „mu20“ für TriggerDecision im Vergleich mit inklusiver und exklusiver Definition lässt den Schluss zu, dass die Signaturen auf Level 2 inklusiv definiert sind.

Auf Event Filter Ebene stimmt die TriggerDecision mit der inklusiven Definition für die 6 GeV Schwelle auf 2 % und für die 20 GeV Schwelle auf weniger als 6 % genau überein. Event Filter Signaturen sind also genau wie Level 2 Signaturen inklusiv definiert. Gleichzeitig muss man sich jedoch darüber im Klaren sein, dass die Nachbildung der Triggerentscheidung, obwohl sie über einen weiten Bereich gut mit der TriggerDecision übereinstimmt, zumindest für die höheren p_T -Schwellen auf Event Filter Ebene ungenauer wird.

4.3.2 Myontriggersignaturen für $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$

Neben seiner Bedeutung als Kalibrationskanal für das ATLAS Myonspektrometer (vgl. Kapitel 4.2) hat der myonische Zerfall von Z -Bosonen noch weitere interessante physikalische Aspekte. So bieten z.B. die Messungen des Wirkungsquerschnitts und des transversalen Impulsspektrums des Z -Bosons mögliche Tests für das Standardmodell, und könnten zum Teil sogar von exotischen Physikprozessen abhängen. Außerdem ist $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$ auch als gemeinsamer Hintergrundprozess für viele Physikanalysen von Bedeutung (vgl. [19]).

Gegenüber den im vorigen Kapitel behandelten Einzelmyonen gibt es für den Myontrigger bei Z -Zerfällen zwei wesentliche Unterschiede. Zum einen entstehen nun bei jedem Ereignis typischerweise zwei Myonen, somit erhöht sich entsprechend die Wahrscheinlichkeit, eine bestimmte Einzelmyontriggersignatur auszulösen. Zum anderen sind die Transversalimpulse der Myonen nicht mehr gleichverteilt, denn die meisten der aus Z -Zerfällen stammenden Myonen besitzen ein p_T von rund 40 GeV, also knapp unter der halben Masse des Z -Bosons⁵.

Tabelle 4.3 gibt die Effizienzen für die nachgebildete Triggerentscheidung ebenso wie die aus dem TriggerDecision-Objekt gewonnenen Effizienzen an.

Für die Nachbildung wurde mindestens ein LVL1_ROI, MuonFeature bzw. TrigMuonEF-Objekt mit passender p_T -Abschätzung verlangt. Die Effizienz für die Signaturen aus dem TriggerDecision-Objekt stimmen mit der Nachbildung (Definition bei Level1 exklusiv, Level2 und Event Filter inklusiv) in ähnlicher Weise überein, wie es im vorigen Kapitel für die Einzelmyonen der Fall war. (Die unterschiedlichen Effizienzen für Level 2 lassen sich auf die dortige Einschränkung der Pseudorapidität auf den Fassbereich zurückführen.) Die Nachbildung lässt sich also, mit den gegebenen Einschränkungen für die Genauigkeit bei den höheren Triggerschwellen auf Event Filter Ebene und die fehlende Triggerinformation auf Level 2 außerhalb des Fassbereichs, auch auf Z -Zerfälle anwenden.

⁵Die genaue p_T -Verteilung für den verwendeten Datensatz findet sich im Anhang (A.1.2).

Stufe	Triggerschwelle	TriggerDecision	exkl. Definition	inkl. Definition
LVL1	MU06	0,9 %	0,7 %	87,7 %
	MU08	0,9 %	0,8 %	87,4 %
	MU10	4,3 %	4,1 %	87,0 %
	MU11	6,2 %	6,1 %	85,3 %
	MU20	14,3 %	14,1 %	82,0 %
	MU40	74,1 %	73,9 %	73,9 %
LVL2	mu06	85,9 %	0 % (Fass)	97 % (Fass)
	mu08	-	1 % (Fass)	97 % (Fass)
	mu10	-	0 % (Fass)	96 % (Fass)
	mu11	-	6 % (Fass)	96 % (Fass)
	mu20	73,9 %	54 % (Fass)	95 % (Fass)
	mu40	-	72 % (Fass)	72 % (Fass)
EF	mu06	83,5 %	10,1 %	85,7 %
	mu08	-	15,5 %	85,0 %
	mu10	-	9,2 %	84,0 %
	mu11	-	11,9 %	83,4 %
	mu20	70,5 %	49,2 %	75,3 %
	mu40	-	41,3 %	41,3 %

Tabelle 4.3: Effizienzen für Singlemyontriggersignaturen bei $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$, die Effizienz für die exkl./inkl. Level 2 Definition berücksichtigt nur Ereignisse, bei denen ausschließlich Myonen im Fassbereich auftreten. Statistischer Fehler ca. 0,1 %, für Level 2 ca. 1 %.

4.3.3 Dimyontriggersignaturen für $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$

Nun, da man die Triggerentscheidung für die verschiedenen Einzelmyonschwellen nachvollziehen kann, ist es möglich, diese zu Signaturen zu kombinieren. Bei $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$ bieten sich Signaturen an, die zwei Myonkandidaten mit gleichem oder unterschiedlichem Transversalimpuls fordern, so ließen sich beispielsweise durch die Definition einer scharfen DimyonSignatur die meisten Myonen aus Zerfällen von b-Quarks herausfiltern, die sonst wegen ihres zahlreichen Auftretens für eine hohe Triggerrate sorgen würden.

Die Anzahl der Ereignisse, für die eine Signatur erfüllt ist, kann dann bestimmt werden, indem man für jedes Ereignis die Anzahl der Myonen abzählt, zu denen das passende LVL1_ROI, MuonFeature bzw. TrigMuonEF-Objekt die richtige p_T -Abschätzung für die betrachtete Schwelle zurückgibt. So würde man zum Beispiel für die (exklusive) Definition einer „MU06MU20“-Signatur auf Level 1 zwei Myonen verlangen, für die das jeweilige passende LVL1_ROI Objekt im einen Fall 6 GeV als höchste erfüllte Schwelle zurückgibt, im anderen Fall 20 GeV. Abschließend wird die so gewonnene Zahl auf die Gesamtzahl der Ereignisse im Datensatz normiert.

Tabelle 4.4 gibt auf diese Weise ermittelten Effizienzen für alle möglichen 2er-Kombinationen aus den sechs Standardschwellen an. Dabei fällt ins Auge, dass aufgrund der exklusiven Definition des Triggers auf Level 1 in Verbindung mit den ausgedehnten Turn-on-Kurven für dessen p_T -Abschätzung (vgl. 4.1.1) nur die Signatur „2MU40“ (zwei Myonkandidaten mit jeweils 40 GeV als höchste erfüllte Schwelle) für einen größeren Anteil (30,0%) der gegebenen $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$ Ereignisse erfüllt ist. Alle anderen Kombinationen auf Level 1 hätten also in einem Triggermenü (in dem die Signaturen mit ODER verknüpft sind) keinen bis wenig Einfluss auf die zu erwartende akzeptierte Rate von myonischen Z -Zerfällen.

Mangels Triggerinformation für Level 2 außerhalb des Fassbereiches sind die in Tabelle 4.5 angegebenen Effizienzen nur untereinander vergleichbar. Man kann jedoch die Aussage ableiten, dass es erst bei Signaturen schärfer als „mu11mu20“ bzw. einer beliebigen Signatur mit 40 GeV Schwelle zu einem deutlicheren Rückgang der Effizienz für Z -Zerfällen kommt, als bei der „2mu06“-Signatur.

Auf Event Filter Ebene zeigen die Effizienzen relativ zueinander ein ähnliches Verhalten. Während 38,2 % der Ereignisse die „2mu06“-Signatur erfüllen, sind es für die „2mu20“-Signatur immerhin noch 33,0 %. Sobald allerdings ein Myonkandidat mit 40 GeV verlangt wird, fällt die Effizienz auf unter 27% ab, so dass die schärfste ohne allzu großen Signalverlust wählbare Signatur „2mu20“ wäre.

LVL1 exkl.	MU06	MU08	MU10	MU11	MU20	MU40
MU06	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,1 %	0,4 %
MU08		0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,1 %	0,3 %
MU10			0,1 %	0,1 %	0,3 %	2,0 %
MU11				0,2 %	0,5 %	2,4 %
MU20					0,1 %	6,0 %
MU40						30,0 %

Tabelle 4.4: Effizienzen für Dimyontrigger bei $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$, Level 1 (exklusiv, statistischer Fehler ca. 0,1 %).

LVL2 inkl.	mu06	mu08	mu10	mu11	mu20	mu40
mu06	67 %	67 %	67 %	67 %	67 %	56 %
mu08		67 %	67 %	67 %	67 %	56 %
mu10			67 %	67 %	66 %	55 %
mu11				66 %	66 %	55 %
mu20					62 %	52 %
mu40						21 %

Tabelle 4.5: Effizienzen für Dimyontrigger bei $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$, Level 2 (inklusive, nur Ereignisse, bei denen ausschließlich Myonen im Fassbereich auftreten, statistischer Fehler ca. 1 %).

EF inkl.	mu06	mu08	mu10	mu11	mu20	mu40
mu06	38,2 %	38,2 %	38,2 %	38,2 %	37,4 %	26,6 %
mu08		38,0 %	37,9 %	37,9 %	37,1 %	26,5 %
mu10			37,5 %	37,5 %	36,8 %	26,4 %
mu11				37,2 %	36,6 %	26,3 %
mu20					33,0 %	24,7 %
mu40						10,0 %

Tabelle 4.6: Effizienzen für Dimyontrigger bei $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$, Event Filter (exklusiv, statistischer Fehler ca. 0,1 %).

4.3.4 Dimyontrigger bei Zerfällen von Leptoquarks der zweiten Generation

Während $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$ einen relativ großen Wirkungsquerschnitt hat, und man bei LHC bei einer Luminosität von $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ca. 15 Ereignisse pro Sekunde erwarten kann, muss man sich bei exotischen Physikprozessen mit Ereignisraten von einigen 1000 Ereignissen pro Jahr oder sogar noch weniger begnügen. Damit nicht ein Großteil dieser Ereignisse bereits vom Trigger verworfen wird, benötigt man besonders hohe Triggereffizienzen für seltene Prozesse.

Ein Beispiel für solche einen seltenen Prozess sind Zerfälle von Leptoquarks. Dies sind hypothetische Teilchen, die sowohl eine Lepton- als auch eine Baryonenzahl aufweisen. Sie tauchen in verschiedenen Theorien zur Erweiterung des Standardmodells der Teilchenphysik auf.

Je nach Theorie werden ihre Eigenschaften (wie z.B. ihre Teilchenmassen) unterschiedlich vorhergesagt. So wären nach dem derzeit für die Suche nach Leptoquarks bei Colliderexperimenten maßgeblichen *minimum Buchmüller-Rückl-Wyler-Modell* (vgl. [22]) unter anderem Leptoquarks der zweiten Generation möglich, die in ein Quark und ein Myon zerfallen. Ein möglicher, experimentell bis dato noch nicht ausgeschlossener Wert für deren Masse wäre 400 GeV. Bei paarweiser Erzeugung von Leptoquarks würde jedes solche Ereignis zwei äußerst hochenergetische Myonen beinhalten. Für die meisten Myonen aus diesen Zerfällen rechnet man mit einem Transversalimpuls von 50 GeV bis zu 300 GeV⁶.

Möchte man nun analog zur Vorgehensweise im vorigen Kapitel die Effizienzen für Dimyontrigger bei solchen Reaktionen betrachten, so muss man zunächst wieder einen prüfenden Blick auf die Einzeleffizienzen werfen. Tabelle 4.7 zeigt analog zum Einzelmyonendatensatz und $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$, dass die Effizienzen für die nachgebildeten Einzelsignaturen mit denen aus der TriggerDecision auf Level 1 besser als 2 %, auf Event Filter Ebene besser als 5 % übereinstimmen.

⁶Die genaue Transversalimpulsverteilung und weitere Informationen zum benutzten Leptoquark-Datensatz finden sich im Anhang (vgl. A.1.3).

Stufe	Triggerschwelle	TriggerDecision	exkl. Definition	inkl. Definition
LVL1	MU06	2,1 %	1,2 %	-
	MU08	1,4 %	0,9 %	-
	MU10	7,0 %	5,4 %	-
	MU11	4,0 %	3,4 %	-
	MU20	6,6 %	6,4 %	-
	MU40	86,8 %	86,7 %	-
LVL2	mu06	90,5 %	-	96,2 % (Fass)
	mu08	-	-	96,0 % (Fass)
	mu10	-	-	95,7 % (Fass)
	mu11	-	-	95,6 % (Fass)
	mu20	86,6 %	-	94,8 % (Fass)
	mu40	-	-	92,8 % (Fass)
EF	mu06	88,3 %	-	90,0 %
	mu08	-	-	89,7 %
	mu10	-	-	89,3 %
	mu11	-	-	89,2 %
	mu20	84,2 %	-	88,0 %
	mu40	-	-	86,2 %

Tabelle 4.7: Effizienzen für Singlemyon-Trigger bei 400 GeV Leptoquarks der zweiten Generation. Für die Triggerstufen sind jeweils nur die dem ATLAS-Triggermenü entsprechenden Definitionen angegeben. Die inkl. Definition für Level 2 berücksichtigt nur Ereignisse, bei denen ausschließlich Myonen im Fassbereich auftreten.

Die Effizienzen in Tabelle 4.8 für die nachgebildeten Dimyontriggersignaturen auf Level 1 zeigen aufgrund ihrer exklusiven Definition und der gegenüber $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$ zu hohen Transversalimpulsen verschobenen p_T -Verteilung lediglich für die „2MU40“-Signatur eine nennenswerte Effizienz.

LVL1 exkl.	MU06	MU08	MU10	MU11	MU20	MU40
MU06	0,0 %	0,0 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,9 %
MU08		0,1 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,5 %
MU10			0,3 %	0,2 %	0,3 %	3,9 %
MU11				0,2 %	0,2 %	2,1 %
MU20					0,3 %	4,3 %
MU40						49,9 %

Tabelle 4.8: Effizienzen für Dimyontrigger bei 400 GeV Leptoquarks der zweiten Generation, Level 1 (exklusiv).

Auf Level2 (Tabelle 4.9) sind die Effizienzen, da nur für den Fassbereich ermittelbar, wieder nur relativ zueinander vergleichbar. Wie man erkennt, stellt die Signatur „2mu20“ für die meisten Zerfälle von Leptoquarks keine größere Hürde dar, als z.B. „2mu06“.

LVL2 inkl.	mu06	mu08	mu10	mu11	mu20	mu40
mu06	67,3 %	67,2 %	67,2 %	67,2 %	66,9 %	66,1 %
mu08		66,9 %	66,8 %	66,8 %	66,6 %	65,8 %
mu10			66,2 %	66,2 %	66,1 %	65,4 %
mu11				66,1 %	66,0 %	65,3 %
mu20					64,2 %	63,8 %
mu40						58,1 %

Tabelle 4.9: Effizienzen für Dimyontrigger bei 400 GeV Leptoquarks der zweiten Generation, Level2, inklusive Definition; nur Ereignisse, bei denen ausschließlich Myonen im Fassbereich auftreten.

Auch auf Event Filter Ebene (Tabelle 4.10) könnte man die Erfüllung einer scharfen Signatur fordern, und würde dabei nur wenig mehr Ereignisse verlieren als durch weniger restriktive Signaturen.

EF inkl.	mu06	mu08	mu10	mu11	mu20	mu40
mu06	54,9 %	54,9 %	54,8 %	54,8 %	54,5 %	54,0 %
mu08		54,5 %	54,5 %	54,5 %	54,3 %	53,8 %
mu10			54,1 %	54,1 %	54,0 %	53,6 %
mu11				54,1 %	53,9 %	53,5 %
mu20					53,0 %	52,8 %
mu40						50,0 %

Tabelle 4.10: Effizienzen für Dimyontrigger bei 400 GeV Leptoquarks der zweiten Generation, Event Filter (inklusive).

Die hier angegebenen Abschätzungen für die Effizienzen von Dimyontriggern geben den Anteil der Signalereignisse an, die eine solche Signatur in einem Triggermenü erfüllen würden. Dieser Anteil liegt bei fast allen auf Event Filter Ebene definierten nachgebildeten Dimyontriggersignaturen bei knapp über 50%. Das mag zunächst nach wenig aussehen. Nun muss man aber in Betracht ziehen, dass man auf der Suche nach neuen Physikprozessen bei ATLAS auf *cut-basierte* Analysen setzt. Das bedeutet, man stellt gezielt Anforderungen an Ereignisse, um so den Untergrund im Verhältnis zum eigentlichen Signal zu unterdrücken. Eine dieser Anforderungen an ein Leptoquarkereignis könnte zum Beispiel die Forderung nach zwei Myonen mit einem Transversalimpuls von über 60 GeV sein (vgl. [23]). Nach allem, was die in dieser Arbeit gezeigten Studien ergeben haben, hätte ein Ereignis, welches einer solchen Anforderung genügt, bessere Chancen, einen Dimyontrigger auszulösen. Die Chance, dass ein Leptoquark Ereignis, das den Anforderungen einer cut-basierten Analyse genügt, von einem Dimyontrigger dann auch akzeptiert wird, kann somit auf deutlich über 50 % eingeschätzt werden, so dass für die Suche nach Leptoquarks die Aufnahme eines Dimyontriggers in ein Triggermenü durchaus Sinn machen würde, sollten die Triggerraten für Einzelmyonsignaturen die geforderten Obergrenzen überschreiten.

5 Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

Der ATLAS-Myontrigger besteht aus 3 Triggerstufen: Die erste Stufe (Level 1) ist hardwarebasiert, während die zweite (Level 2) und dritte Stufe (Event Filter) auf Software aufbauen. Level 1 nutzt die Information aus den schnellen RPC und TGC Triggerkammern, um Myonen anhand ihres Transversalimpulses p_T nach sechs programmierbaren Schwellen zu unterscheiden und ihnen eine grobe Richtungsinformation sowie das korrekte LHC Bunch-Crossing zuzuordnen. Die Algorithmen von Level 2 laufen auf von Level 1 selektierten Regions of Interest und bilden ein Myon-Spurobjekt, das eine schnelle p_T -Abschätzung beinhaltet. Im Event Filter laufen für den Trigger modifizierte offline-Rekonstruktionsalgorithmen, die Zugriff auf die komplette Ereignisinformation haben.

Das ATLAS Softwarepaket Athena kann unter anderem dazu verwendet werden, simulierte ATLAS-Messdaten zu produzieren. Diese können im *Analysis Object Data* (AOD) Format gespeichert werden. AOD-Daten enthalten *Container* gefüllt mit Objekten, die alle relevanten Informationen enthalten. Die für diese Arbeit genutzten Triggerinformation für Level 1, Level 2 und Event Filter sind in LVL1_ROI, MuonFeature bzw. TrigMuonEF Objekten abgelegt. Das *TriggerDecision* Objekt enthält die Triggerentscheidungen für das verwendete Triggermenü.

Mit Hilfe eines Datensatzes von 200.000 vollsimulierten Einzelmyonereignissen, gleichverteilt in Transversalimpuls p_T (0 GeV bis 100 GeV), Pseudorapidität η (-2,5 bis 2,5) und Azimutwinkel ϕ ($-\pi$ bis π), wurde zunächst die Akzeptanz und Effizienz des ATLAS-Myontriggers analysiert. Die Triggereffizienzen für Level 1 nach Transversalimpuls zeigen typische Turn-on-Kurven und sättigen je nach betrachteter Triggerschwelle bei einem Plateauwert von 80-86%. Für Level 2 und Event Filter zeigen diese Turn-on-Kurven deutlich steilere Anstiegsflanken, was auf eine bessere Impulsmessung zurückgeführt werden kann. Die Triggereffizienzen in Abhängigkeit von der Pseudorapidität zeigen charakteristische Bereiche niedrigerer Effizienz für $|\eta| \approx 0$ (Versorgungsleitungen für Inneren Detektor, Kalorimeter), $|\eta| \approx 0,5$ / $|\eta| \approx 0,8$ (Standfüße und Toroidspulen des ATLAS Detektors). Weitere Akzeptanzlücken bei $|\eta| \approx 1,25$ (Übergang zwischen Fass- und Endkappenbereich) und $|\eta| > 2$ (Grenze zwischen innerer MDT- und CSC-Präzisionsmyonkammer) treten erst bei den höheren Triggerstufen in Erscheinung.

Untersuchungen zur Ladungsabhängigkeit der Triggereffizienz ergaben statistisch signifikante Unterschiede bei der getrennten Bestimmung der Effizienzen nach Pseudorapidität für positive und negative Myonen in den bereits erwähnten Bereichen niedrigerer Effizienz für

Level 1 und Level 2. Auf Event Filter Ebene konnten gegenüber Level 2 keine signifikanten ladungsabhängigen Effizienzunterschiede mehr festgestellt werden.

Um die Güte der p_T -Abschätzungen des Triggers auch quantitativ einschätzen zu können, wurde deren Auflösung durch das iterative Anpassen von Gauß-Funktionen an die Verteilung von $\frac{p_T^{\text{rekonstruiert}} - p_T^{\text{true}}}{p_T^{\text{true}}}$ zu 3,8 % für Level 2 und 2,7 % für den Event Filter bestimmt. Als Vergleichswert für den rekonstruierten Impuls ergab sich ebenfalls 2,7 %.

In einem alternativen Ansatz wurden Triggereffizienzen mit der Tag & Probe Methode bestimmt. Die gefundenen Effizienzen bestätigen im Wesentlichen die für Einzelmyonen erzielten Ergebnisse. Unterschiede im Bereich zwischen Turn-on-Kurve und Plateau für die Effizienz in Abhängigkeit vom Transversalimpuls konnten auf die unterschiedliche Pseudorapiditätsverteilung der Ausgangsmyonen zurückgeführt werden.

Des Weiteren wurden die im TriggerDecision Objekt abgelegten Entscheidungen zu den im vorliegenden Triggermenü „CSC06“ definierten Einzelmyonentrigger signatures anhand der Informationen aus den LVL1_ROI, MuonFeature und TrigMuonEF Objekten nachvollzogen, um Triggersignaturen für zwei Myonen zu bilden und Näherungswerte für deren mögliche Effizienz anzugeben.

Für myonische Z -Zerfälle wäre auf Level 1 aufgrund der exklusiven Definition nur ein „2MU40“ Trigger nennenswert effizient (30 %). Die Näherungseffizienzen können mangels MuonFeature-Information im Übergangs- und Endkappenbereich für Level 2 Dimyontrigger nur für Ereignisse angegeben werden, die keine Myonen außerhalb des Fassbereichs aufweisen. Die so gefundenen Effizienzen bewegen sich größtenteils in einem Bereich von ca. 66 %. Für Dimyontriggersignaturen auf Event Filter Ebene wurden größtenteils Effizienzen ca. 36 % geschätzt.

Für Zerfälle von 400 GeV Leptoquarks der zweiten Generation in Quarks und Myonen ist auf Level 1 ebenfalls nur „2MU40“ nennenswert effizient (49,9 %). Die möglichen Effizienzen für Level 2 (wiederum ohne Ereignisse mit Myonen außerhalb des Fassbereichs) wurden ebenfalls größtenteils mit ca. 66 % angegeben. Auf Event Filter Ebene fanden sich zumeist Effizienzen von ca. 53 %. Die Effizienzen für Leptoquark-Reaktionen, die den Anforderungen einer cut-basierten Analyse genügen (beispielsweise „zwei Myonen mit jeweils $p_T > 60 \text{ GeV}$ “) können als deutlich höher eingeschätzt werden.

5.2 Ausblick

Die Repräsentation des Triggers im Athena-Softwarepaket ist einem ständigen Wandel unterworfen, viele Objekttypen sind erst seit kurzem oder noch nicht vollständig verfügbar, so erwartet man zum Beispiel seit langem die MuonFeature-Information für Übergangs- und Endkappenbereich.

Eine weitere geplante Neuerung ist die Möglichkeit, den Prozess der Entscheidungsfindung für die TriggerDecision auch für Myonen auf AOD-Daten mit selbstdefinierten Triggermenüs neu ablaufen zu lassen, wie es jetzt schon für den Elektrontrigger möglich ist. Das Studium von Dimyontriggereffizienzen oder die Optimierung von Triggermenüs wären dann eine leichte Aufgabe.

Aber auch mit bestehenden Mitteln bieten sich eine Reihe interessanter Ansätze. Um beispielsweise eine sinnvolle Wahl für ein Triggermenü mit möglichst hoher Selektivität bei einer möglichst hohen Effizienz für bestimmte Teilchenreaktionen zu erhalten, könnte man Datensätze mit verschiedenen Untergrund- und Signalprozessen untersuchen. Beginnend mit einem Triggermenü aus allen hier gezeigten Einzel- und Dimyonsignaturen könnte man dann iterativ die am wenigsten restriktiven Signaturen entfernen, bis die erlaubte Triggerrate unterschritten ist. Von besonderem Interesse in diesem Zusammenhang wäre ein *Stream Sample*, also ein Datensatz, der nicht nur bestimmte Teilchenreaktionen enthält, sondern in seiner Zusammensetzung den zu erwartenden Messdaten vom ATLAS-Detektor entspricht.

Auch Untersuchungen zu Trigger-Isolationskriterien, sowie zu Kombinationen aus Myon-, Jet- und Elektrontriggern wären möglich.

Bei allen derartigen Betrachtungen darf man jedoch nicht die Tatsache aus den Augen verlieren, dass nicht alle theoretisch denkbaren Triggerkriterien und Verknüpfungen auch in der Realität umgesetzt werden können. Der nächste logische Schritt wäre also das Überprüfen der praktischen Anwendbarkeit der Ergebnisse und Vorschläge, die sich in dieser Arbeit ergeben haben.

A Anhang

A.1 Verwendete Datensätze

Für diese Arbeit wurden folgende Datensätze verwendet:

A.1.1 Einzelmyonen

- Eigenproduktion, vollsimuliert
- generiert mit ParticleGenerator (siehe [14]):

```
ParticleGenerator.orders = [  
  "id: sequence -13 13",  
  "pt: flat 0 100000",  
  "eta: flat -2.5 2.5",  
  "phi: flat 0 6.283"]
```

- Athena Versionen: evgen & simul: 12.0.31(.8) recon: 12.0.6(.4)
- geometryTag: ATLAS-CSC-01-00-00 (new magnetic field, perfect geometry)
- Triggermenü: CSC-06

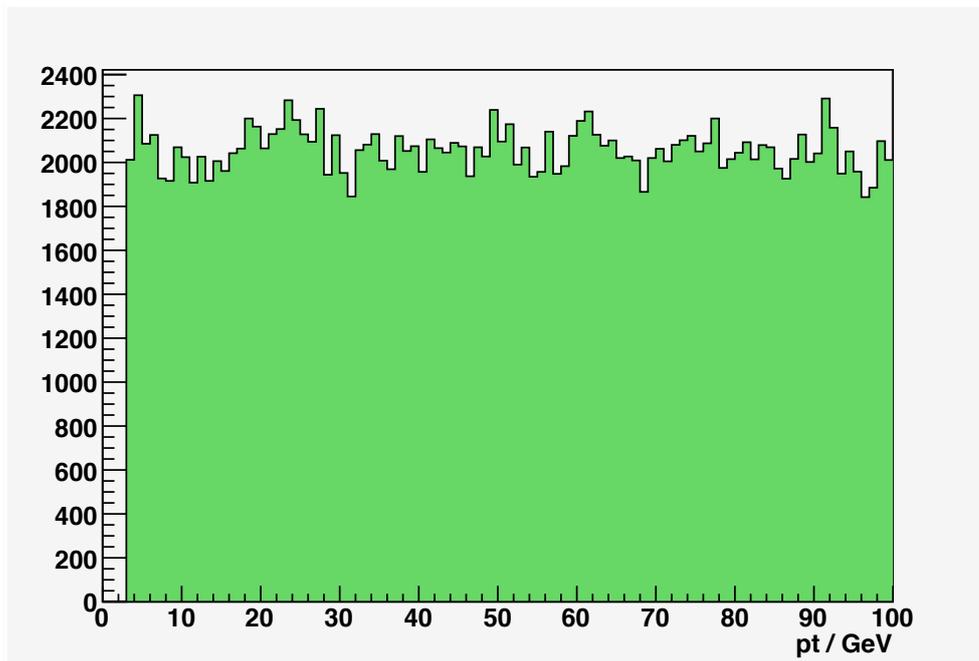


Abbildung A.1: Einzelmyonen: Truth-Verteilung nach p_T

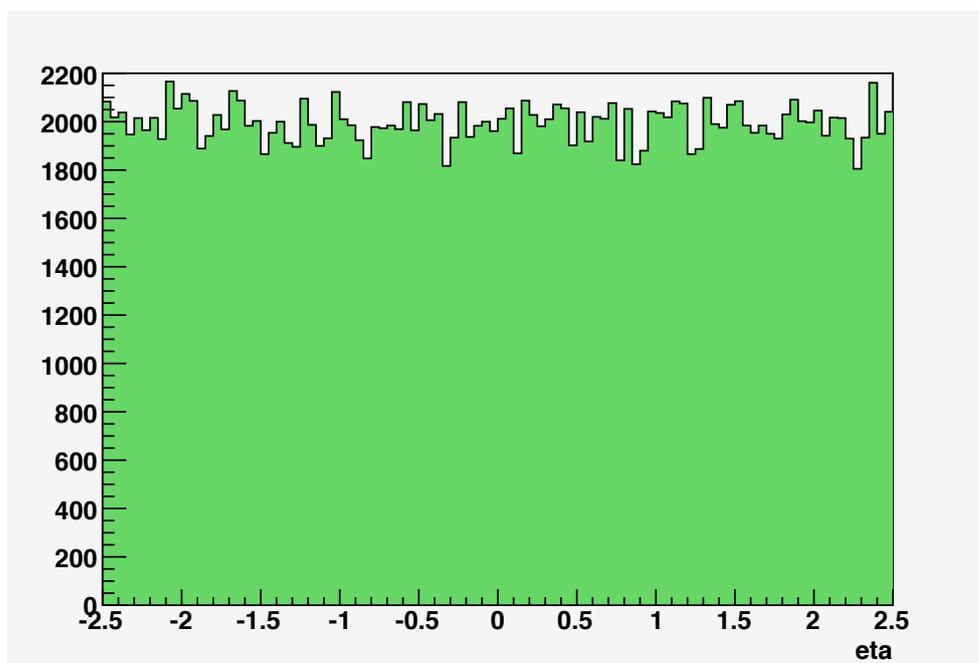


Abbildung A.2: Einzelmyonen: Truth-Verteilung nach η

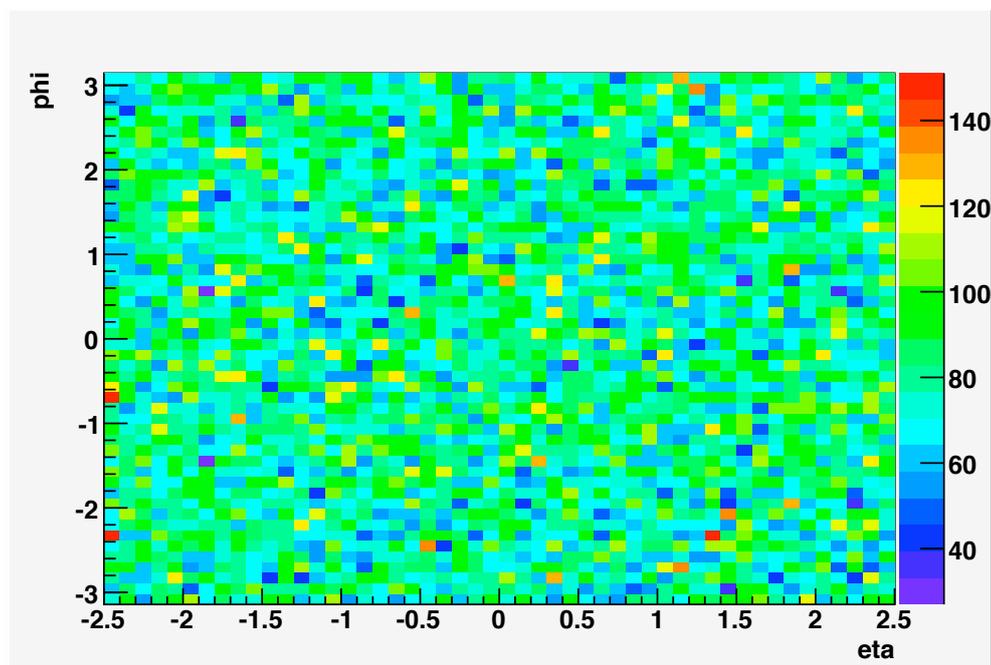


Abbildung A.3: Einzelmyonen: Truth-Verteilung nach η und ϕ

A.1.2 $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$

- offizielle Produktion, Run Nummer 5145
- ATLAS Software Version 12.0.6
- Generierung & Simulation
geometryTag: ATLAS-CSC-01-02-00
(new magnetic field, misaligned geometry with material distortions)
geometryTag: ATLAS-CSC-01-01-00
(new magnetic field, misaligned geometry without material distortions)
- Triggermenü: CSC-06

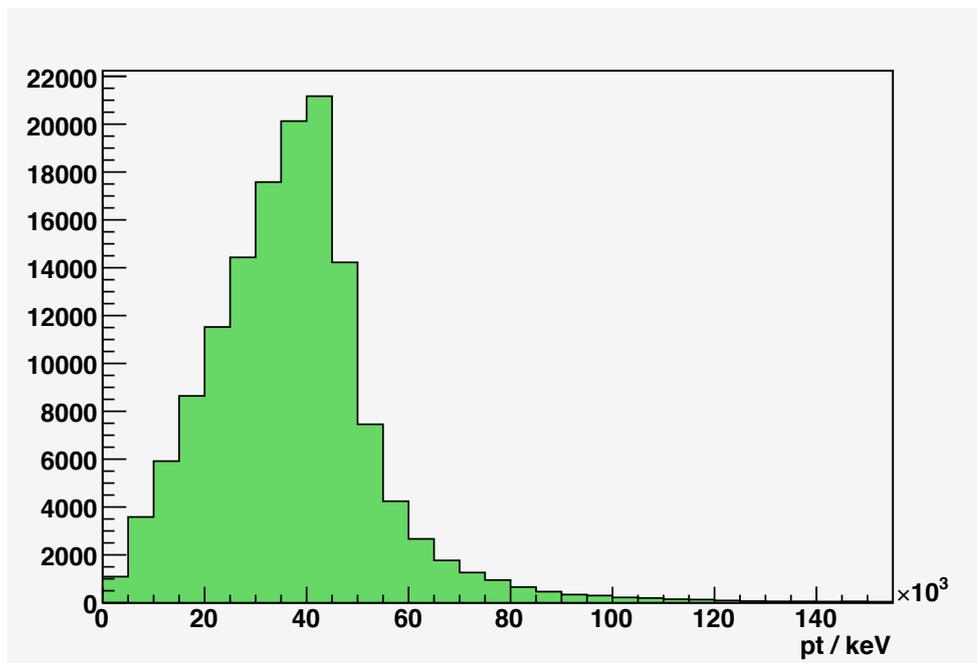
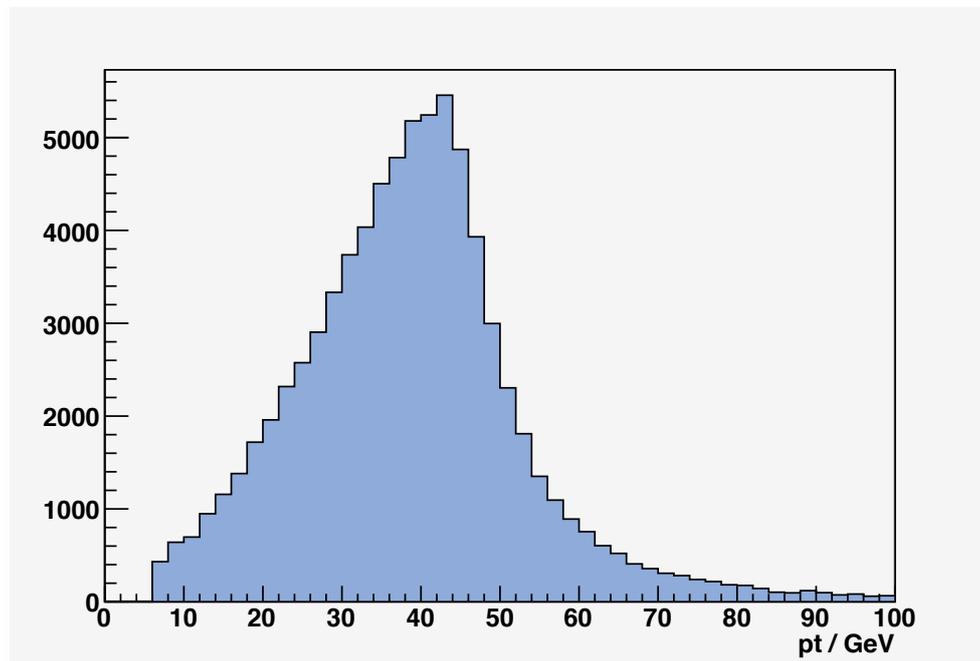
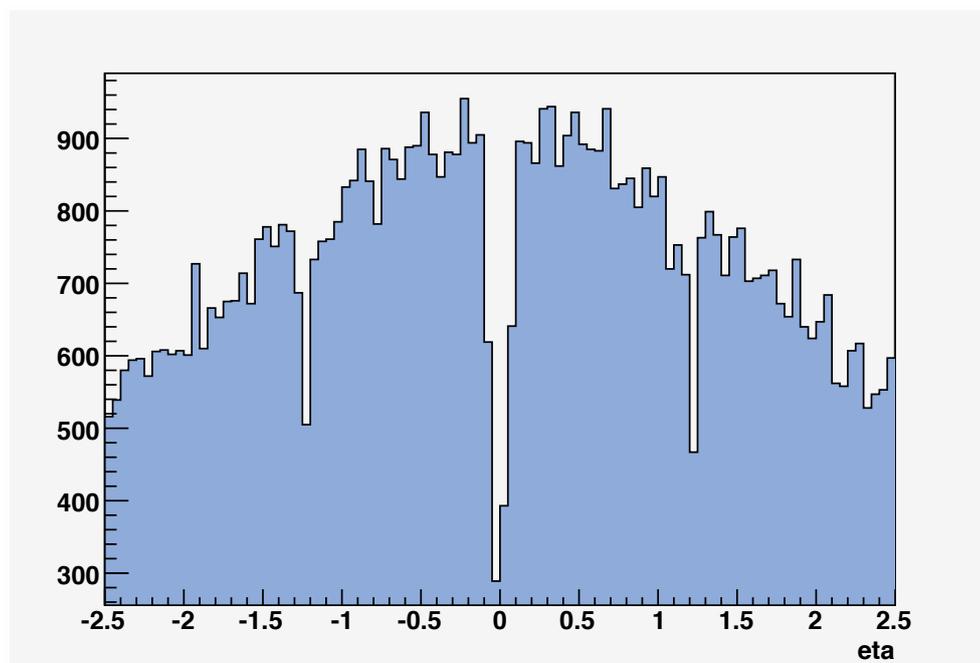


Abbildung A.4: $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$: Truth-Verteilung nach p_T

Abbildung A.5: Verteilung der für Tag & Probe selektierten Myonen nach p_T Abbildung A.6: Verteilung der für Tag & Probe selektierten Myonen nach η

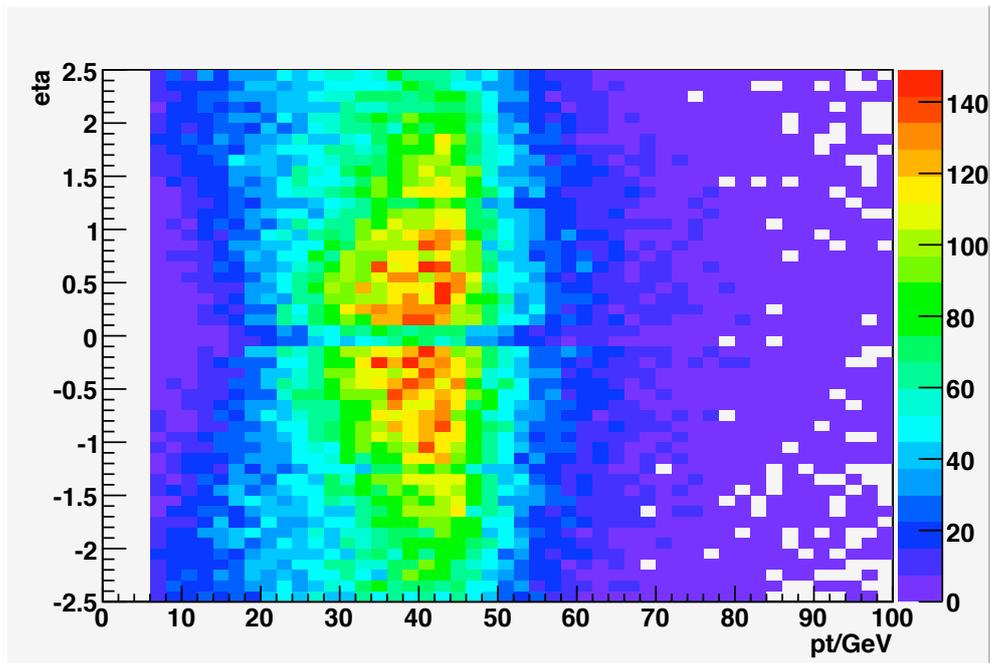


Abbildung A.7: Verteilung der für Tag & Probe selektierten Myonen nach p_T und η

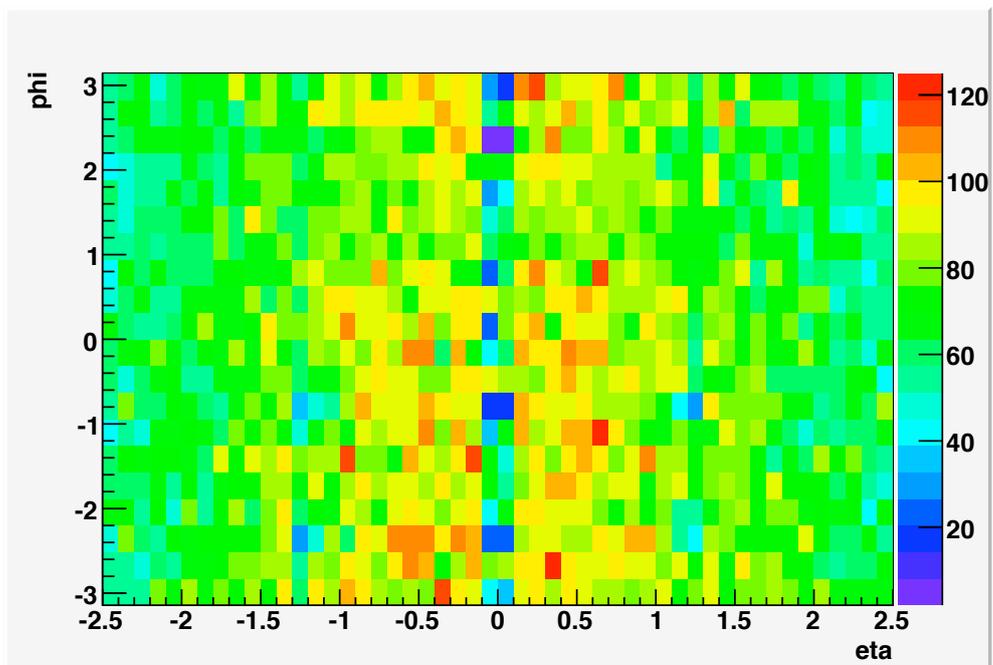


Abbildung A.8: Verteilung der für Tag & Probe selektierten Myonen nach η und ϕ

A.1.3 Leptoquarks der zweiten Generation (400 GeV)

- offizielle Produktion, Run Nummer 5632
- $m(LQ) = 400$ GeV, decay: $LQ \rightarrow u\mu$
- ATLAS Software Version 12.0.6
- Generierung & Simulation
geometryTag: ATLAS-CSC-01-02-00
(new magnetic field, misaligned geometry with material distortions)
- Rekonstruktion:
geometryTag: ATLAS-CSC-01-01-00
(new magnetic field, misaligned geometry without material distortions)
- Triggermenü: CSC-06

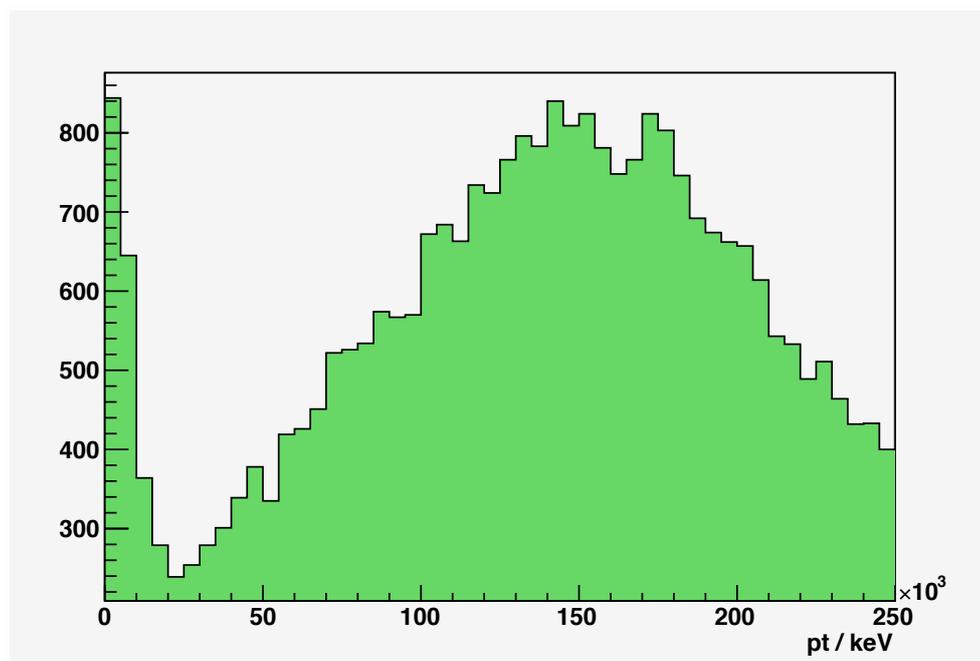


Abbildung A.9: 400 GeV Leptoquarks der zweiten Generation: Truth-Verteilung nach p_T

A.2 Bestimmung des statistischen Fehlers für Triggereffizienzen

Der Ereignisraum bei einem Triggervorgang beschränkt sich auf genau zwei Möglichkeiten: „Annahme“ oder „Ablehnung“. Bei der Bestimmung einer Effizienz geht man davon aus, dass jeder Triggervorgang unabhängig vom vorhergehenden stattfindet, so dass die Annahmewahrscheinlichkeit konstant ist. Es handelt sich also bei der Anzahl n der vom Trigger angenommenen Teilchen bzw. Events um eine binomial verteilte Zufallsgröße, deren Verteilung durch (A.1) gegeben ist:

$$P(X = n) = \binom{N}{n} \cdot \epsilon^n \cdot (1 - \epsilon)^{N-n} \quad (\text{A.1})$$

Die beiden Parameter der Verteilung sind die Annahmewahrscheinlichkeit ϵ und die Gesamtzahl der Teilchen/Events N .

Die Binomialverteilung hat den Erwartungswert $\mu = N \cdot \epsilon$ und die Standardabweichung $\sigma = \sqrt{N\epsilon \cdot (1 - \epsilon)}$ (vgl. [24]).

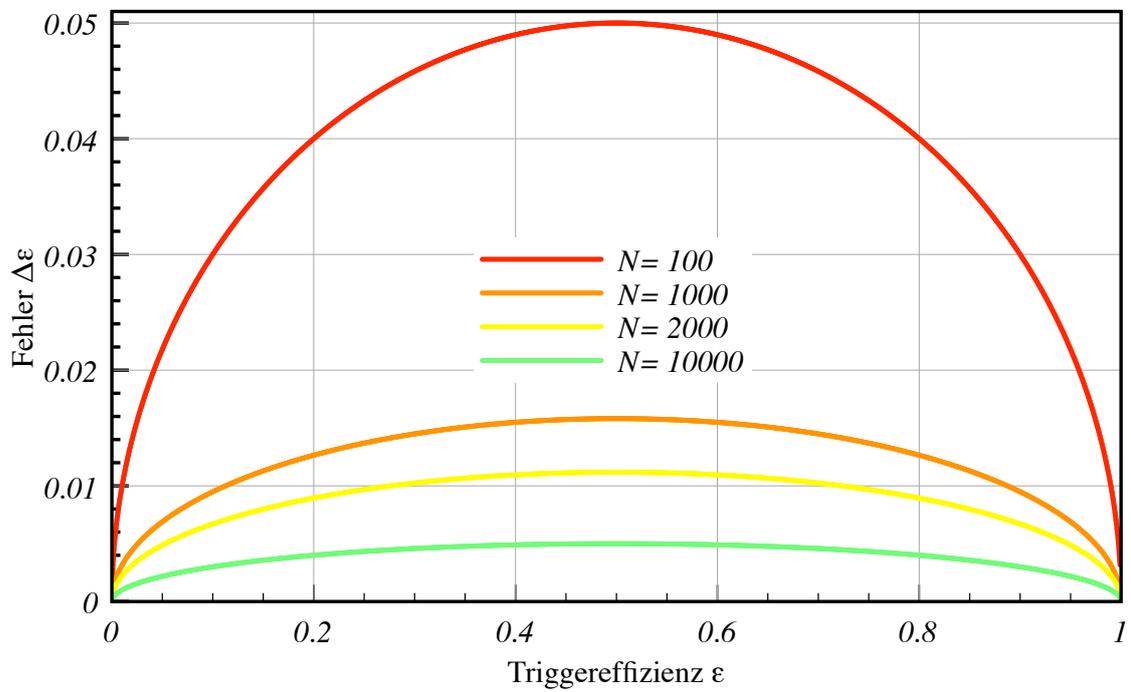
Als statistischen Fehler auf den Erwartungswert wählt man die Standardabweichung:

$$\Delta\mu = \Delta(N\epsilon) = \sigma = \sqrt{N\epsilon \cdot (1 - \epsilon)} \quad (\text{A.2})$$

Teilt man beide Seiten von Gleichung (A.2) durch die (konstante) Anzahl der Teilchen bzw. Events N , so erhält man auf die Triggereffizienz ϵ den Fehler $\Delta\epsilon$:

$$\Delta\epsilon = \frac{\sigma}{N} = \frac{1}{N} \sqrt{N\epsilon \cdot (1 - \epsilon)} = \sqrt{\frac{\epsilon \cdot (1 - \epsilon)}{N}} \quad (\text{A.3})$$

Abbildung A.10 gibt den Fehler $\Delta\epsilon$ auf die Effizienz ϵ für verschiedene Gesamtzahlen der Teilchen bzw. Events N an.

Abbildung A.10: Fehler auf Triggereffizienz in Abhängigkeit von der Gesamtzahl N

Abbildungsverzeichnis

1.1	LHC Tunnel	1
1.2	Überblick über die Experimente am LHC	2
1.3	ATLAS-Koordinatensystem	3
1.4	Schematische Darstellung des ATLAS-Detektors	5
1.5	Querschnitt durch das Myonspektrometer	7
1.6	3D-Ansicht des Myonspektrometers	8
2.1	Schematische Darstellung des ATLAS Level 1 Myon Triggers	10
2.2	Triggerstufen bei ATLAS	11
4.1	Einzelmyoneffizienz für Level 1 nach p_T	18
4.2	Einzelmyoneffizienz für Level 1 nach η	19
4.3	Schnitt durch das Myonspektrometer (y - z -Ebene)	20
4.4	Geometrische Akzeptanz nach η für eine bzw. drei getroffene Myonkammern	20
4.5	Einzelmyoneffizienz für Level 1 nach η und ϕ , 20 GeV Schwelle	21
4.6	Einzelmyoneffizienz für Level 2 nach p_T -Schwellen	22
4.7	Einzelmyoneffizienz für Level 2 nach η	23
4.8	Einzelmyoneffizienz für Level 2 nach η und ϕ	24
4.9	Einzelmyoneffizienz für Event Filter nach p_T	25
4.10	Einzelmyoneffizienz für Event Filter nach η	26
4.11	Einzelmyoneffizienz für Event Filter nach η und ϕ	27
4.12	Einzelmyoneffizienz für Level 1 nach Ladung und η	28
4.13	normierte Einzelmyoneffizienz für Level 1 nach Ladung und η	29
4.14	Einzelmyoneffizienz für Level 2 nach Ladung und η	30
4.15	Einzelmyoneffizienz für Event Filter nach Ladung und η	30
4.16	Auflösungsbestimmung der Level 2 (muFast) p_T -Abschätzung	32
4.17	Auflösungsbestimmung der Event Filter p_T -Abschätzung	32
4.18	Auflösungsbestimmung der Myonspektrometer p_T -Messung	33

4.19	Triggereffizienzen aus Tag & Probe nach Transversalimpuls p_T	36
4.20	Triggereffizienzen für Level 1 aus Tag & Probe und Einzelmyonen nach Transversalimpuls p_T	36
4.21	Triggereffizienzen aus Tag & Probe nach Pseudorapidität η	37
4.22	Triggereffizienzen aus Tag & Probe nach Pseudorapidität η und Azimutwinkel ϕ	37
A.1	Einzelmyonen: Truth-Verteilung nach p_T	54
A.2	Einzelmyonen: Truth-Verteilung nach η	54
A.3	Einzelmyonen: Truth-Verteilung nach η und ϕ	55
A.4	$Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$: Truth-Verteilung nach p_T	56
A.5	Verteilung der für Tag & Probe selektierten Myonen nach p_T	57
A.6	Verteilung der für Tag & Probe selektierten Myonen nach η	57
A.7	Verteilung der für Tag & Probe selektierten Myonen nach p_T und η	58
A.8	Verteilung der für Tag & Probe selektierten Myonen nach η und ϕ	58
A.9	400 GeV Leptoquarks der zweiten Generation: Truth-Verteilung nach p_T . . .	59
A.10	Fehler auf Triggereffizienz	61

Tabellenverzeichnis

3.1	Myontrigger in Triggermenü „CSC-06“	16
4.1	Ergebnis der p_T -Auflösungsbestimmung für Level 2, Event Filter und Myon- spektrometer bei Einzelmyonen, p_T gleichverteilt zwischen 0 GeV und 100 GeV	31
4.2	Effizienzen für Singlemyontriggersignaturen bei Einzelmyonen	39
4.3	Effizienzen für Singlemyontriggersignaturen bei $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$	41
4.4	Effizienzen für Dimyontrigger bei $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$, Level 1	43
4.5	Effizienzen für Dimyontrigger bei $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$, Level 2	43
4.6	Effizienzen für Dimyontrigger bei $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$, Event Filter	43
4.7	Effizienzen für Myontrigger bei 400 GeV Leptoquarks der zweiten Generation	45
4.8	Effizienzen für Dimyontrigger bei 400 GeV Leptoquarks der zweiten Generation, Level 1	46
4.9	Effizienzen für Dimyontrigger bei 400 GeV Leptoquarks der zweiten Generation, Level 2	46
4.10	Effizienzen für Dimyontrigger bei 400 GeV Leptoquarks der zweiten Generation, Event Filter	47

Literaturverzeichnis

- [1] *öffentliche CERN Website*. www.cern.ch 1.1, 1, 1.2, 1.4
- [2] *öffentliche ATLAS Website*. www.atlas.ch 4
- [3] THE ATLAS COLLABORATION: ATLAS Detector and Physics Performance Technical Design Report / CERN. 1999. – Technical Report 1.2, 1.3, 2.2, 4.1.1, 4.3, 4.4
- [4] ATLAS MUON COLLABORATION: ATLAS Muon Spectrometer Technical Design Report / CERN. 1997. – Technical Report 1.3, 1.5, 1.6, 2.1
- [5] CHRISTIANSEN, T.: *Search for Second-Generation Leptoquarks in $p\bar{p}$ Collisions*, Ludwig-Maximilians-Universität München, Diss., 2003 2
- [6] A. SIDOTI ET AL.: The ATLAS Muon Trigger Slice. In: *Nucl. Instr. Meth. A 572*, 139 (2007) 2.1
- [7] A. SIDOTI ET AL.: Implementation and performance of the ATLAS Trigger Muon „Vertical Slice“. In: *ATL-DAQ-CONF-2007-006*, 12.04.2007, 2007 2.2
- [8] ATLAS HIGH LEVEL TRIGGER GROUP: Configuration of the ATLAS Trigger System. In: *Computing in High Energy and Nuclear Physics, 24-24 March 2003, La Jolla, California*, 2003 2.3
- [9] ATLAS COMPUTING GROUP: ATLAS Computing Technical Design Report / CERN. 2005. – Technical Report 1, 3.2
- [10] *Python Programming Language Official Website*. www.python.org 3.1
- [11] *offizielle Atlfast Website*. <http://www.hep.ucl.ac.uk/atlas/atlfast/> 3.2
- [12] *ATLAS Workbook*. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Atlas/WorkBook> 3.2
- [13] *offizielle PYTHIA Website*. <http://www.thep.lu.se/~torbjorn/Pythia.html> 3.2
- [14] HINCHLIFFE, Ian ; STAVROPOULOS, Giorgos: *Atlas Monte Carlo Interfaces Webpage*. <http://www-theory.lbl.gov/~ianh/monte/Generators/> 3.2, A.1.1
- [15] *offizielle GEANT4 Website*. cern.ch/geant4/ 3.2
- [16] SCHÖRNER-SADENIUS, T. ; TAPPROGGE, S.: *ATLAS Trigger Menus for the LHC Start-up Phase*. 2003. – ATLAS Note ATL-DAQ-2003-004 3.3.4

-
- [17] *ATLAS Trigger Menu Versions Wiki Page*. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Atlas/TriggerMenuVersions> 3.3.4, 3.1
- [18] *TriggerDecision Wiki Page*. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Atlas/TriggerDecision> 3.3.4
- [19] SCHOTT, Matthias: *Cross-section measurement $\sigma(pp \rightarrow Z/\gamma^* \rightarrow \mu^+\mu^-)$ with the first $50pb^{-1}$* . 2007. – ATLAS Note ATL-COM-PHYS-2007-032 4.1.5, 4.2, 4.3.2
- [20] *TriggerDecisionMaker Wiki Page*. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Atlas/TriggerDecisionMaker> 4.3.1
- [21] *ROI Builder Wiki Page*. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Atlas/RoIB> 4.3.1
- [22] W. BUCHMÜLLER, R. RÜCKL, D. WYLER: Leptoquarks in lepton-quark collisions. In: *Physics Letters B, Volume 448, Issue 3-4, p. 320-320* (1999) 4.3.4
- [23] G. KROBATH ET AL.: Search for Second Generation Leptoquarks with ATLAS at the LHC. In: *Maier-Leibnitz-Laboratorium der Universität München Jahresbericht* (2006) 4.3.4
- [24] RÅDE, L. ; WESTERGREN, B.: *Springers Mathematische Formeln*. Springer, 2000 A.2

Vielen herzlichen Dank...

Zum Schluß möchte ich mich bei den Personen bedanken, die maßgeblich zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben. Ein herzliches Dankeschön geht an:

- *Prof. Dr. Otmar Biebel* für die Erstellung des Erstgutachtens, die hervorragende Betreuung und vor allem dafür, dass er trotz seines vollen Terminplans immer ein offenes Ohr und einen guten Rat für mich hatte
- *Prof. Dr. Wolfgang Dünneweber* für die Erstellung des Zweitgutachtens
- *Britta Tiller, Christian Kummer, Raphael Mameghani* und *Gaby Reiter* für die gute Büroatmosphäre und die unzähligen kleinen Tips und Ratschläge, die das physikalische Leben leichter machen
- *Johannes Elmsheuser, Petra Haefner, Gernot Krobath, Marion Lambacher, Alexander Mlynek, Thomas Müller, Felix Rauscher, Matthias Schott* und Triggerexpertin *Monika Wielers*, die mir oft wichtige Fragen beantworten und wertvolle Hinweise geben konnten
- *Johannes Ebke* für die Simulation der Einzelmyonen auf dem GRID
- *Christian Kummer, Gernot Krobath, Raphael Mameghani, Martina Reithmeier* und vor allem *Otmar Biebel* für das Korrekturlesen dieser Arbeit
- alle am Lehrstuhl für Elementarteilchenphysik, denen ich bisher noch nicht gedankt habe: *Philippe Calfayan, Günter Duckeck, Albert Engl, Frank Fiedler, unsere Sekretärin Herta Franz, Julien de Graat, Alexander Grohsjean, Ralf Hertenberg, John Kennedy, Peter Lang, Doris Merkl, Thomas Nunnemann, Benjamin Ruckert, Dorothee Schaile, Otto Schaile, Cedric Serfon, Raimund Ströhmer* und *Attila Varga*

Besonderer Dank gilt...

- Apple Computer für das MacBook und MacOS X, sowie dem Entwicklerteam von „TeXShop“: so kann sogar LaTeX Freude machen
- *Tobias Ruffer* und meinen Kollegen bei *srpa.com*
- meinen langjährigen Kommilitonen *Markus Breuer* und *Stephan Sandvoss* für ihre moralische Unterstützung während des Studiums
- meinen Eltern *Rudolf und Annette*, sowie meinem Bruder *Achim*, die es geschafft haben, während der Entstehung dieser Arbeit sämtliche Probleme der „realen“ Welt von mir fernzuhalten.

Selbständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit, die vorliegende Arbeit selbständig verfaßt zu haben und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben.

Martin Lamprecht

München, den 13. Juni 2007

